

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO

WAUIRES RIBEIRO DE MAGALHÃES

PROPOSIÇÃO E APLICAÇÃO DE UM MODELO PARA PRIORIZAÇÃO DE RISCO
BASEADO EM FMEA E *HESITANT FUZZY-TOPSIS*

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2020

WAUIRES RIBEIRO DE MAGALHÃES

PROPOSIÇÃO E APLICAÇÃO DE UM MODELO PARA PRIORIZAÇÃO DE RISCO
BASEADO EM FMEA E *HESITANT FUZZY-TOPSIS*

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Administração no Programa de Pós-graduação em Administração da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Área de Concentração: Organizações e Tecnologia

Orientador: Prof. Dr. Francisco Rodrigues Lima Junior

CURITIBA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Magalhães, Wauires Ribeiro de

Proposição e aplicação de um modelo para priorização de risco baseado em FMEA e Hesitant Fuzzy-TOPSIS [recurso eletrônico] / Wauires Ribeiro de Magalhães.-- 2020.

1 arquivo texto (108 f.) : PDF ; 752 KB.

Modo de acesso: World Wide Web

Título extraído da tela de título (visualizado em 16 jun. 2020)

Texto em português com resumo em inglês

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Programa de Pós-graduação em Administração, Curitiba, 2020

Bibliografia: f. 94-104.

1. Administração - Dissertações. 2. Administração de risco. 3. Análise de modo e efeitos de falha. 4. Chicotes elétricos - Fabricação. 5. Produtos industrializados. I. Lima Junior, Francisco Rodrigues. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Administração. III. Título.

CDD: Ed. 23 – 658

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Bibliotecário: Adriano Lopes CRB-9/1429

TERMO DE APROVAÇÃO
PROPOSIÇÃO E APLICAÇÃO DE UM MODELO PARA PRIORIZAÇÃO DE RISCO
BASEADO EM FMEA E HESITANT FUZZY-TOPSIS

por

Wauires Ribeiro de Magalhães

Esta dissertação foi apresentada às **13h00, dia 15 de abril de 2020** como requisito parcial para a obtenção do título de **MESTRE EM ADMINISTRAÇÃO**, na Linha de Pesquisa **Tecnologia e Desenvolvimento Organizacional**, Área de Concentração **Organizações e Tecnologia**, do Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após a deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Francisco Rodrigues Lima Junior
(PPGA/UTFPR)
Orientador

Profa. Dra. Cleina Yayoe Okoshi
(UTFPR)
Membro Interno

Profa. Dra. Nadya Regina Galo
(UFG)
Membro Externo

Prof. Dr. Jurandir Peinado
(PPGA/UTFPR)
Membro Interno

Prof. Dr. Thiago Cavalcante Nascimento
Coordenador do PPGA

Agradecimentos

Ao se aproximar o final de um ciclo, iniciamos a reflexão sobre os vários momentos vivenciados ao longo da caminhada. Necessário se faz reconhecer as coisas, circunstâncias e acima de tudo, as pessoas que contribuíram direta e indiretamente para que este estudo pudesse ser realizado.

Agradeço primeiramente a Deus e aos meus pais, Manoel (*in memoriam*) e Roseli, pelos incansáveis esforços que me possibilitaram chegar até aqui. Um agradecimento muito especial à minha companheira de todas as horas, por compreender e agir com amor incomensuravelmente fraternal ao meu às vezes, não tão bom humor, frente às dificuldades impostas por este estudo. Da impossibilidade das nossas sessões de cinema em casa aos finais de semana e em tantos outros momentos de agradável convivência, os quais se tornaram mais raros em função da carga de leitura. A você Renata, meu agradecimento, minha admiração e o meu carinho, pelo seu tão importante suporte e o incentivo para que eu seguisse em frente com este projeto.

Muito obrigado também aos meus filhos e estudantes, Lucas e Luciana que durante esta jornada, nos encontrávamos às voltas com livros, apostilas, artigos e anotações de aula. Compartilhar, trocar, conversar e até reclamar do cansaço com esses dois (típico de estudante) durante esse período, foi um combustível extra que me manteve energizado e com motivação adicional para cumprir as tarefas.

Agradecimento pontual ao professor e meu orientador Dr. Francisco Rodrigues Lima Júnior pela confiança, pela paciência e pelo apoio entusiasmado em fazer dessa pesquisa uma valorosa contribuição para a área da Administração. Aos colegas de turma que em vários momentos foram muito importantes no encorajamento, suporte e divisão do trabalho durante as etapas do curso.

Enfim, ciente de que juntos somos mais fortes, minha gratidão a todos, mesmo os não citados nominalmente e que de alguma forma me conduziram até este momento.

“O real não é nunca aquilo em que se poderia acreditar, mas é sempre aquilo em que deveríamos ter pensado”

Gaston Bachelard

RESUMO

MAGALHÃES, W.R. **Proposição e Aplicação de um Modelo para Priorização de Risco baseado em FMEA e *Hesitant Fuzzy-TOPSIS***. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Administração – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

O presente estudo propõe um modelo baseado em FMEA e *Hesitant Fuzzy-TOPSIS* para apoiar o processo global de avaliação de riscos no contexto da fabricação industrial. O modelo computacional foi implementado no software *Microsoft Excel*[®] e aplicado no processo de fabricação de chicotes elétricos de uma empresa nacional, líder no fornecimento para o segmento de máquinas agrícola. A aplicação teve como objetivo principal testar e avaliar o comportamento do modelo em uma situação real de avaliação de risco em processo. Os resultados da aplicação sugerem que o modo de falha “Decape – comprimento menor que o especificado” representa o maior nível de risco do processo de fabricação, podendo provocar perda parcial ou total da função primária do chicote elétrico. Com base nos resultados da aplicação piloto e da análise de sensibilidade, o modelo proposto se apresenta como uma alternativa eficaz para apoiar as atividades de avaliação de risco. As saídas do modelo fornecem subsídios para a formulação de planos de ação com base no nível de risco dos modos de falhas analisados. Outras contribuições deste estudo consistem em: permitir a utilização de critérios adicionais aos do FMEA tradicional; considerar a importância relativa dos critérios selecionados; suportar a decisão em grupo; possibilitar o uso de mais de um termo linguístico para expressar os julgamentos dos decisores; e apoiar a tomada de decisão em situação de hesitação e ambiguidade.

Palavras-chave: Gestão de riscos; FMEA; RPN; *Hesitant Fuzzy-TOPSIS*; Decisão Multicritério.

ABSTRACT

MAGALHÃES, W.R. **Proposition and Application of a Risk Prioritization Model based on FMEA and Hesitant Fuzzy-TOPSIS**. Dissertation (Master's). Post graduate Program in Administration - Federal Technological University of Paraná, Curitiba, 2020.

The present study proposes a model based on the methods FMEA and Hesitant Fuzzy-TOPSIS to support the global risk assessment process in the context of industrial manufacturing. The computational model was implemented in Microsoft Excel[®] software and applied in the harnesses manufacturing process in a national company and leader in the supply for the agricultural machinery segment. The main objective of the application was to test and evaluate the model's behavior in a real risk assessment situation in process. The results of the application suggest that the failure mode "Decape - less than specified length" represents the highest level of risk in the manufacturing process, which may cause partial or total loss of the primary function of the harness. Based on the results of the pilot application and the sensitivity analysis, the proposed model presents itself as an effective alternative to support risk assessment activities. The outputs of the model provide inputs for the formulation of action plans based on the risk level of the analyzed failure modes. Other contributions of this study consist of: allowing the use of additional criteria to those of the traditional FMEA; consider the relative importance of the selected criteria; support the group decision making; enable the use of more than one linguistic term to represent the judgment of decision makers; and support decision-making in situations of hesitation and ambiguity.

Keywords: Risk management; FMEA; RPN; Hesitant Fuzzy-TOPSIS; Multi-criteria Decision-Making.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo de atividades do processo de gestão de riscos	33
Figura 2 - Número fuzzy triangular.....	50
Figura 3 - Conjunto de sete termos e sua semântica	51
Figura 4 - Modelo <i>Hesitant Fuzzy</i> -TOPSIS para avaliação e priorização de riscos em processos	61
Figura 5 - Visão geral dos processos de fabricação.....	65
Figura 6 - Operações do processo preparação	66
Figura 7 - Operação corte e crimpagem automáticos e seus resultados	67
Figura 8 - Escala com cinco termos linguísticos e sua semântica	69
Figura 9 - Variação da RC dos modos de falhas em cada cenário analisados	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Normas e padrões para a gestão de riscos	31
Quadro 2 - Descrição das etapas de aplicação do FMEA	37
Quadro 3 - Escala para classificação da severidade de um modo de falha.....	38
Quadro 4 - Escala para classificação da ocorrência de um modo de falha	39
Quadro 5 - Escala para classificação da detecção de um modo de falha.....	39
Quadro 6 - Principais problemas da etapa de avaliação de riscos do FMEA	41
Quadro 7 - Estudos com modelos prévios baseados em FMEA	44
Quadro 8 - Perfil da equipe de decisores	65
Quadro 9 - Modos de falhas da operação de corte e crimpagem automáticos.....	68
Quadro 10 - Expressões linguísticas utilizadas para o julgamento das alternativas	69
Quadro 11 - Avaliação dos pesos dos critérios usando expressões linguísticas	70
Quadro 12 - Conversão da avaliação dos pesos dos critérios para o formato HFLTS.....	71
Quadro 13 - Julgamento dos modos de falhas em relação aos critérios (Decisor E1).....	71
Quadro 14 - Julgamento dos modos de falhas em relação aos critérios (Decisor E2).....	72
Quadro 15 - Julgamento dos modos de falhas em relação aos critérios (Decisor E3).....	72
Quadro 16 - Julgamento dos modos de falhas em relação aos critérios (Decisor E4).....	73
Quadro 17 - Julgamento dos modos de falhas em relação aos critérios (Decisor E5).....	74
Quadro 18 - Resultados do cálculo de RC e ordenação dos modos de falhas.....	80
Quadro 19 – Comparativo de resultados entre o modelo proposto e o FMEA tradicional.	81
Quadro 20 - Pesos atribuídos aos critérios em cada cenário	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da revisão sistemática de literatura	27
Tabela 2 - Julgamentos da importância dos critérios no formato de envoltório HFLTS ...	75
Tabela 3 - Matriz de separação ideal positiva	75
Tabela 4 - Matriz de separação ideal negativa.....	75
Tabela 5 - Pesos dos critérios com base nos valores de CC_i	76
Tabela 6 - Pesos dos critérios com base no CC_i normalizado.....	76
Tabela 7 - Valores agregados das avaliações dos modos de falhas.....	77
Tabela 8 - Distâncias dos valores das alternativas em relação a PIS	78
Tabela 9 - Distâncias dos valores das alternativas em relação a NIS	79
Tabela 10 - Resultados da análise de sensibilidade nos cenários propostos	85
Tabela 11 - Comparativo da discriminação de RC em relação às escalas utilizadas	88

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANP	<i>Analytic Network Process</i>
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
AS/NZS	<i>Australian and New Zealand</i>
CEE	<i>Comissão Especial de Estudos</i>
COSO	<i>Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission</i>
DEMATEL	<i>Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory</i>
ELECTRE	<i>Elimination and Choice Expressing Reality</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FST	<i>Fuzzy Set Theory</i>
FTF	<i>Fuzzy Time Function</i>
GRA	<i>Grey Relational Analysis</i>
HFLTS	<i>Hesitant Fuzzy Linguistic Term Set</i>
HFS	<i>Hesitant Fuzzy Sets</i>
IATF	<i>International Automotive Task Force</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IRMF	<i>Integrated Risk Management Framework,</i>
IVIFS	<i>Interval-valued Intuitionistic Fuzzy Set</i>
MADM	<i>Multi-attribute Decision Making</i>
MCDM	<i>Multi-criteria Decision Making</i>
MODM	<i>Multi-objective Decision Making</i>
MULTIMOORA	<i>Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis</i>
NBR	Norma Brasileira
NIS	<i>Negative Ideal Solution</i>
PIS	<i>Positive Ideal Solution</i>
PPM	Partes por milhão
RC	<i>Relative Closeness</i>
RPN	<i>Risk Priority Number</i>

TC	<i>Technical Committee</i>
TODIM	<i>Interactive Multi-Criteria Decision Making</i>
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	15
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	18
1.3 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS DA PESQUISA	22
1.4 CONTRIBUIÇÕES.....	23
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
CAPÍTULO 2: PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	25
2.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO.....	25
2.2 ETAPAS DA PESQUISA	26
CAPÍTULO 3: REFERENCIAL TEÓRICO	29
3.1 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE GESTÃO DE RISCOS.....	29
3.1.1 A gestão de riscos em processos de fabricação industrial	35
3.2 O MÉTODO FMEA	36
3.2.1 Problemas da etapa de avaliação de riscos do método FMEA	40
3.2.2 Aplicações do FMEA combinado com métodos MCDM em processos de fabricação industrial	43
3.3 DESCRIÇÃO DO MÉTODO UTILIZADO	49
3.3.1 Introdução à Teoria dos Conjuntos <i>Fuzzy</i>	49
3.3.2 Fundamentos dos Conjuntos <i>Hesitant Fuzzy</i>	50
3.3.2.1 Definição 1: <i>Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets</i>	51
3.3.2.2 Definição 2: Limite superior e inferior de um HFLTS.....	52
3.3.2.3 Definição 3: Envoltório de um HFLTS.....	52
3.3.2.4 Definição 4: Transformação de expressões linguísticas em HFLTS	53
3.3.2.5 Definição 5: Distância entre dois intervalos lingüísticos	53
3.3.3 O Método TOPSIS.....	53
3.4 O MÉTODO HESITANT FUZZY-TOPSIS.....	55
CAPÍTULO 4: PROPOSIÇÃO DO MODELO	60
4.1 MODELO PARA AVALIAÇÃO E PRIORIZAÇÃO DE RISCOS EM PROCESSOS ..	60
CAPÍTULO 5: APLICAÇÃO PILOTO	64
5.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA PARTICIPANTE	64

5.2 PROCEDIMENTO DA APLICAÇÃO DO MODELO	65
5.2.1 Identificação e análise de riscos em processo (Etapa 1).....	65
5.2.2 Aplicação do modelo para determinação dos pesos dos critérios (Etapa 2)	74
5.2.3 Aplicação do modelo para avaliação dos modos de falha (Etapa 3)	77
CAPÍTULO 6: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO	83
CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES	89
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICE A - ROTEIRO UTILIZADO NA PESQUISA DE CAMPO	102

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o contexto no qual o tema da pesquisa se insere e quais são os problemas que ensejaram o desenvolvimento deste estudo. Descreve ainda, os objetivos, as contribuições e como o estudo está organizado.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

No ambiente industrial a percepção do risco sempre esteve presente. Somente em anos recentes, ele vem sendo gerenciado ativamente para produtos, projetos e como consequência para o desempenho econômico, resultados ambientais, bem como segurança das organizações (OLSSON, 2007). A norma ABNT NBR ISO 31.000 (2018, p. 1) definiu o termo risco como “o efeito da incerteza nos objetivos”. Aven e Renn (2009) encontraram na literatura dez definições diferentes e com base nesta constatação, afirmaram que inexistem um consenso sobre a definição de risco. Para esses autores, risco é a “incerteza e gravidade dos eventos e consequências (ou resultados) de uma atividade em relação a algo que os seres humanos valorizam” (AVEN; RENN, 2009, p. 6). Apesar da aparente falta de consenso em torno da definição, o foco em gerenciamento de riscos tem aumentado cada vez mais nas organizações. Para apoiar essa atividade, diferentes normas e estruturas foram desenvolvidas para fornecer diretrizes para identificar, avaliar e gerenciar efetivamente os riscos (ALE; AVEN; JONGEJAN, 2009).

Segundo Aven (2011b), gerenciar riscos de maneira eficaz pode auxiliar as organizações a alcançar e manter um bom desempenho por meio de técnicas adequadas para se evitar perdas e manter equilíbrio nos conflitos inerentes na exploração de oportunidades. Ao sistematizar conhecimento e analisar a incerteza na consecução de um sistema, torna-se possível prever os problemas potenciais, suas causas e consequências, criando as condições para classificar e mitigar os riscos identificados (AVEN, 2011a).

Haq *et al.* (2015) assevera que as indústrias de manufatura são submetidas continuamente a uma intensa pressão em função de alterações bruscas e inesperadas da demanda do mercado, sendo este, um entre os muitos fatores que contribuem para um elevado aumento da ocorrência de falhas e incidentes em

seus processos. De acordo com Ahmadi, Molana e Sajadi (2017), os processos de fabricação expostos a este crescente e variado número de modos de falhas, fazem com que a tarefa de avaliar os riscos associados a estas falhas e a subsequente tomada de decisão, seja cada vez mais difícil e complexa para os gestores. A gestão de riscos nesse contexto se torna uma inevitável necessidade para a sobrevivência das organizações que competem em tais mercados (AHMADI; MOLANA; SAJADI, 2017).

Para apoiar os gestores no planejamento, implantação e manutenção da gestão de riscos, alguns padrões foram criados e disponibilizados. Na literatura são encontrados diversos estudos que propõem métodos e técnicas para apoiar o processo da gestão de riscos em diferentes contextos. Marhavillas, Koulouriotis e Gemeni (2011) identificaram na literatura, 17 principais métodos para conduzir a identificação, análise e avaliação de riscos de acidentes em locais de trabalho e classificaram em técnicas qualitativas, técnicas quantitativas e técnicas híbridas (qualitativas e quantitativas). Esses métodos e técnicas vêm sendo aplicados largamente no ambiente de projetos de novos produtos, processos de fabricação industrial, transportes, entre outros (MARHAVILLAS; KOULOURIOTIS; GEMENI, 2011).

Na norma ABNT NBR ISO/IEC 31010 (2012), um total de 31 métodos e técnicas foram listados para conduzir o denominado processo global de avaliação de risco, o qual é formado pelas etapas de identificação, análise e avaliação de todos os tipos de riscos. No contexto desta norma, um método denominado Análise do Modo e Efeito da Falha (*Failure Mode and Effect Analysis*, FMEA) é referenciado como um dos métodos mais recomendados para a condução do processo global de avaliação de riscos. Chen (2017) assevera que o FMEA é um dos métodos mais utilizados pelas indústrias pela possibilidade de se realizar uma análise qualitativa usando também pontuações representadas por valores determinísticos. Para Zhao, You e Liu (2017) o FMEA é uma técnica de avaliação prospectiva dos riscos usada para a identificação, análise e eliminação de modos de falhas potenciais, capaz de promover o aumento da segurança e da confiabilidade dos processos de manufatura industrial, entre outros benefícios.

De acordo com Liu, Liu e Liu (2013), na versão tradicional do FMEA, os modos de falhas potenciais são avaliados com base nos critérios, severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D), os quais recebem pontuações a partir de escalas

numéricas que variam de 1 a 10. O produto matemático obtido com as três pontuações dos critérios para cada um dos modos de falhas, determina o número de prioridade de risco (*Risk Priority Number*, RPN), que indica o nível de risco associado à falha (LIU; LIU; LIU, 2013; CARPINETTI, 2016). Normalmente, os modos de falhas com o número de risco (RPN) mais elevado devem receber maior atenção e tratamento prioritário (ZHAO; YOU; LIU, 2017).

É inegável a contribuição do FMEA na condução do processo global de avaliação de riscos e das melhorias obtidas em segurança e de confiabilidade nos processos organizacionais. Por outro lado, problemas inerentes ao método foram detectados e são objetos de muitas críticas por parte dos estudiosos do tema (WANG *et al.*, 2018). Incerteza e subjetividade, dimensionamento de riscos e confiança nos resultados são alguns dos problemas mais citados na literatura relativos à etapa de avaliação de riscos do FMEA (SPREAFICO; RUSSO; RIZZI, 2017).

Para contornar e superar alguns dos problemas relatados, a literatura dispõe vários estudos que propõem modelos que combinam o FMEA com métodos de decisão multicritério (*Multicriteria Decision Making*, MCDM). Liu *et al.* (2019) em uma revisão de literatura, baseada em conteúdo publicado entre 1998 e 2018, na base de dados *Scopus*, analisaram 169 estudos que combinam o FMEA com métodos de apoio à decisão. No total, esses autores identificaram a combinação do FMEA com 68 métodos de decisão multicritério distintos.

Para Ahmadi, Molana e Sajadi (2017), os métodos MCDM auxiliam os gestores responsáveis por conduzir o processo de tomada de decisão em situações de incerteza, que segundo os autores são típicas do processo global de avaliação de riscos executados pelo FMEA, principalmente por se basearem em julgamentos subjetivos de especialistas. Para apoiar a etapa de julgamento das alternativas em relação aos critérios e a determinação do número de prioridade de risco (RPN), a literatura destaca estudos que propõem métodos MCDM incorporados com a teoria dos conjuntos *fuzzy*, como solução para lidar com a incerteza e a subjetividade que afetam a aplicação do FMEA (WANG *et al.*, 2018). Fattahi e Khalilzadeh (2018) propuseram o uso de um método híbrido baseado em *fuzzy-FMEA*, *fuzzy-MULTIMOORA* estendido e *fuzzy-AHP* para investigação de acidentes de trabalho como sendo os modos de falhas em uma aciaria. Outro estudo propõe o método *Intuitionistic fuzzy hybrid-TOPSIS* para determinar as

prioridades dos modos de falhas identificados no FMEA, aplicado em uma indústria de telas de LCD (LIU *et al.*, 2015).

Apesar de os estudos citados apresentarem soluções para algumas das deficiências da etapa de avaliação de riscos do FMEA, persiste nos métodos baseados nos conjuntos *fuzzy* tradicionais, a limitação de uso em razão da possibilidade de adoção de apenas um termo linguístico pelos decisores, como por exemplo, “baixo” ou “médio”. A utilização de apenas um termo linguístico pode não ser suficiente ou adequada para que os membros da equipe do FMEA possam expressar seus julgamentos ou opiniões sobre os modos de falhas (alternativas) em relação aos critérios (LIU *et al.*, 2016). Nesse contexto, os conjuntos *hesitant fuzzy* (*Hesitant Fuzzy Sets*, HFS) propostos por Torra e Narukawa (2009) e Torra (2010), permitem que os avaliadores possam emitir seus julgamentos considerando os intervalos entre um e outro termo, possibilidade essa que torna a escolha mais natural em situações reais de tomada decisão em grupo.

Mais recentemente, os métodos de tomada de decisão com conjuntos de termos linguísticos *fuzzy* hesitantes (*Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets*, HFLTS) vêm sendo empregados em muitos ambientes de decisão sob incerteza (REN; KONG; PEI, 2017). Proposta por Rodriguez, Martinez e Herrera (2012), a abordagem HFLTS possibilita lidar com situações onde os especialistas pensam em mais de um valor linguístico possível ou em expressões mais ricas do que um único termo para uma alternativa, variável e assim por diante. Dessa forma, essa abordagem permite o uso de expressões linguísticas como “entre baixo e médio” e “pelo menos alto”, entre outras (RODRIGUEZ; MARTINEZ; HERRERA, 2012).

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Apesar da ampla utilização do FMEA ao longo de mais de 50 anos na condução da avaliação de risco em processos de manufatura industrial, o método tradicional vem sendo criticado em muitos estudos por apresentar deficiências e limitações (LIU *et al.*, 2016; LO; LIOU, 2018). Conduzido por Liu, Liu e Liu (2013), um estudo de revisão da literatura em 75 artigos de periódicos internacionais identificou 11 problemas relacionados à etapa de avaliação de riscos do FMEA. Spreafico, Russo e Rizzi (2017), com base em uma revisão de literatura em 329 estudos e patentes, nas bases de dados *Elsevier*, *IEEE Xplore*, *Springer*, *Wiley*,

Inderscience, Taylor & Francis, Emerald e em anais de conferências internacionais da *ASME, ASCE e SAGE-Ing International* no período de 1978 a 2016, apontaram um total de 191 problemas no método FMEA. Desse total, 45 deles (23,5%) tiveram origem na etapa de avaliação de riscos, que inclui a pontuação dos modos de falha em relação aos critérios e a determinação do RPN por meio de cálculo (SPREAFICO; RUSSO; RIZZI, 2017).

No presente estudo, uma revisão sistemática da literatura foi realizada com o objetivo de se identificar os modelos prévios de decisão multicritério baseados no FMEA, efetivamente aplicados no contexto dos processos de fabricação industrial. A pesquisa envolveu as bases de dados, *Science Direct, Scopus, Taylor & Francis, Web of Science* e no *Google Scholar* no período de 2000 a 2019. Considerando os artigos publicados no período e com base nesta revisão, foi possível identificar seis problemas relacionados com a etapa de avaliação de riscos do FMEA em 25 estudos selecionados. Os seis problemas identificados nessa pesquisa, também estão presentes na revisão sistemática conduzida por Liu, Liu e Liu (2013). Portanto, os problemas mais recorrentes da etapa de avaliação de risco na literatura do FMEA foram:

- a) A importância relativa entre os critérios, severidade (S), ocorrência (O), e detecção (D), não é levada em consideração (ZHAO; YOU; LIU, 2017);
- b) A fórmula matemática para calcular o RPN é questionável. Não há razão para “S”, “O” e “D”, serem multiplicados para se determinar o RPN (CHEN, 2017);
- c) Diferentes conjuntos de pontuações para “S”, “O” e “D” podem produzir exatamente o mesmo valor de RPN, mas as implicações de risco ocultas podem ser totalmente diferentes (CERTA *et al.*, 2017);

- d) Os critérios “S”, “O”, e “D” são geralmente difíceis de serem precisamente avaliados com o uso de valores numéricos determinísticos, que não permitem quantificar medidas incertas ou imprecisas inerentes da etapa de avaliação de riscos (CAN, 2018);
- e) No cálculo do RPN são considerados apenas três fatores “S”, “O” e “D” principalmente em termos de segurança. Outros fatores importantes como aspectos econômicos ou perdas de produção são ignorados (BANDUKA *et al.*, 2018);
- f) Pequena variação em um dos critérios altera drasticamente o valor de RPN. Por exemplo, se “O” e “D” são pontuados ambos com dez, a diferença de um ponto em “S” causará uma diferença de 100 pontos no RPN. Ao contrário, a mesma diferença de um ponto em “S” irá gerar uma variação de apenas quatro pontos no RPN se “O” e “D” forem ambos, dois pontos (BOZDAG *et al.*, 2015).

Ainda com base nos estudos selecionados na revisão sistemática da literatura realizada pelo presente estudo, foram identificados modelos prévios de decisão multicritério baseados no FMEA, aplicados em processos de fabricação industrial, os quais se apresentaram como uma alternativa para contornar e superar os problemas apontados acima. Apesar das contribuições apresentadas por esses estudos para apoiar a etapa de avaliação de riscos do FMEA, foi possível a identificação de algumas lacunas que oportunizaram e corroboraram o presente estudo. As limitações dos modelos prévios propostos nesses estudos estão relacionadas com:

- a) Escassez de modelos que utilizem critérios diferentes dos três propostos pelo método FMEA (S, O e D). Dos modelos analisados, somente cinco estudos (20%) propuseram critérios novos ou adicionais. Banduka *et al.* (2018) adicionou um critério de custos da não qualidade e outro relativo à segurança além dos tradicionais. Foram adicionados também os critérios de custo, tempo de exposição e segurança do sistema no estudo de Delice e Can (2017). Custo e duração do tratamento foram adotados juntamente com os critérios tradicionais por Yousefi *et al.* (2018). Também Fattahi e Khalilzadeh (2018) utilizaram, tempo, custo e lucro com as ações, além dos critérios tradicionais. Já no estudo de Li,

Wang e Chin (2019) foram propostos novos critérios denominados, importância, dificuldade de mudança, racionalidade e dificuldade de detecção;

- b) Embora 21 modelos prévios (84%) permitam o uso de termos linguísticos para apoiar a tomada de decisão, nenhum deles considera a possibilidade de o decisor emitir seu julgamento utilizando mais de um termo linguístico. Essa possibilidade é desejável na tomada de decisão em situações de grande incerteza, em que a hesitação entre um termo e outro se apresenta. Dessa forma, tais modelos não possibilitam usar mais de um termo linguístico para atribuir a pontuação de um modo de falha para um determinado critério;
- c) Além disso, nenhum deles permite ao decisor o uso de expressões linguísticas, como por exemplo, “entre alto e muito alto” ou “no máximo médio”, para avaliar a pontuação dos modos de falha;
- d) Em mais da metade dos estudos analisados (56%), não foi constatada a possibilidade da participação de múltiplos decisores nos modelos prévios de decisão multicritério para avaliação de riscos em processos industriais.

Na presente pesquisa, os problemas da etapa de avaliação de riscos do FMEA e as limitações dos modelos prévios analisados, ensejaram a proposição de um modelo de decisão multicritério baseado no FMEA, com o potencial de oferecer soluções para os aspectos relatados. Beg e Rashid (2013) desenvolveram o método denominado *Hesitant Fuzzy-TOPSIS* e afirmam que este método se difere de todos os anteriores para a tomada de decisão em grupo, devido ao fato de que o método usa o HFLTS e o TOPSIS simultaneamente. Algumas características dessa técnica como, a possibilidade de se considerar a opinião de múltiplos especialistas, a não limitação da quantidade de critérios e de alternativas envolvidos na tomada de decisão, o uso de expressões linguísticas para o julgamento das alternativas, a utilização de mais de um termo linguístico e a sua adequação em lidar com a incerteza e a hesitação presente em situações de tomada de decisão, foram decisivas para a sua escolha. Portanto, a adoção da técnica *Hesitant Fuzzy-TOPSIS* apresentou-se potencialmente capaz de contornar

os problemas mais recorrentes do FMEA relativos ao procedimento de avaliação de risco e superar as limitações dos modelos prévios.

Com base na revisão sistemática realizada neste estudo e em face dos potenciais benefícios de uso do *Hesitant fuzzy-TOPSIS*, verificou-se que não há estudos prévios que proponham um modelo que combine o FMEA com o método proposto por Beg e Rashid (2013). Em função de tais constatações, foi formulada uma pergunta que estabelece o direcionamento desta pesquisa: como a combinação do FMEA com o *Hesitant fuzzy-TOPSIS* pode auxiliar os gestores e contribuir no gerenciamento de riscos em processos de fabricação industrial, de modo a superar alguns dos principais problemas do FMEA?

1.3 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS DA PESQUISA

Diante do exposto na seção anterior, este estudo tem como objetivo principal, propor e aplicar um modelo de decisão baseado no FMEA combinado com o método *Hesitant Fuzzy-TOPSIS* para apoiar a etapa de avaliação e gerar a priorização dos riscos de um processo de fabricação industrial. Para o cumprimento desse objetivo principal, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar um levantamento sobre modelos prévios de decisão multicritério baseados no FMEA, aplicados em processos de fabricação industrial, de modo a identificar as técnicas e os critérios adotados, bem como os principais problemas da etapa de avaliação de riscos do FMEA apontados em cada estudo;
- b) Desenvolver um modelo conceitual para orientar a aplicação do FMEA combinado com a técnica *Hesitant Fuzzy-TOPSIS*;
- c) Implementar um modelo computacional utilizando-se o software *Microsoft Excel*[®], com base nas equações do método *Hesitant Fuzzy-TOPSIS*;
- d) Aplicar o modelo desenvolvido para conduzir a avaliação e priorização de riscos em um processo de fabricação industrial de uma empresa;
- e) Validar o modelo por meio de uma análise de sensibilidade.

1.4 CONTRIBUIÇÕES

O presente estudo pode contribuir para o avanço da teoria sobre o tema e também para a prática empresarial, uma vez que tem o potencial de apresentar os seguintes resultados:

- a) Mapeamento dos modelos prévios de decisão multicritério baseados no FMEA, aplicados para a avaliação de riscos em processos de fabricação industrial, de modo a identificar as técnicas e critérios utilizados, bem como algumas limitações de uso destes modelos;
- b) Utilização do método *Hesitant Fuzzy-TOPSIS* como uma alternativa de solução para os problemas da etapa de avaliação de riscos do FMEA, listados na seção 1.2;
- c) Combinação do método *Hesitant Fuzzy-TOPSIS* com o FMEA, para lidar com situações de avaliação e priorização de riscos em processos de fabricação industrial que apresentem alto grau de incerteza, ambiguidade e hesitação;
- d) Aplicação piloto do modelo para conduzir a avaliação de riscos em um processo de fabricação industrial. Essa aplicação visa identificar as dificuldades de uso da técnica *Hesitant Fuzzy-TOPSIS* em uma situação real. A empresa selecionada para essa aplicação cumpre a premissa básica de fazer uso corrente do FMEA tradicional para a avaliação de riscos em seus processos de fabricação.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente estudo foi organizado em sete capítulos incluindo esta introdução que contextualiza o tema de pesquisa, define o problema, os objetivos e as contribuições, bem como apresenta os demais capítulos:

- a) Capítulo 2 - discorre sobre a caracterização do presente estudo e descreve os procedimentos metodológicos adotados na condução da pesquisa;

- b) Capítulo 3 - apresenta um referencial teórico sobre a gestão de riscos, o gerenciamento de riscos em processos de fabricação industriais, o método FMEA e suas aplicações combinadas com métodos MCDM, a teoria dos conjuntos *fuzzy* e o método *Hesitant Fuzzy-TOPSIS*;
- c) Capítulo 4 - descreve a proposta do modelo conceitual, que se baseia no FMEA combinado com a técnica *Hesitant Fuzzy-TOPSIS*;
- d) Capítulo 5 – apresenta o procedimento e os resultados de todas as etapas da aplicação piloto do modelo em um dos processos de fabricação de chicotes elétricos de uma empresa nacional líder nesse segmento;
- e) Capítulo 6 – apresenta os resultados da análise da sensibilidade do modelo proposto;
- f) Capítulo 7 – descreve as considerações finais relacionadas com as vantagens e limitações do modelo proposto, sugere estudos futuros sobre o tema e por fim apresenta as conclusões desta pesquisa.

CAPÍTULO 2: PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo apresenta a caracterização da pesquisa e quais foram os procedimentos metodológicos empregados para viabilizar a consecução dos objetivos do presente estudo.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO

A literatura disponibiliza uma grande variedade de conceitos sobre pesquisa, muito em razão da falta de uma visão comum e de consenso entre os estudiosos do tema (MARCONI; LAKATOS, 2010). A seleção de uma abordagem metodológica adequada se torna uma decisão de caráter estratégico, pois a aplicação de métodos e técnicas deve direcionar o modo com que o observador interage com o ambiente pesquisado (MIGUEL, 2007).

De acordo com Bertrand e Fransoo (2002), o presente estudo pode ser classificado como sendo uma pesquisa quantitativa axiomática normativa baseada em modelagem e simulação. É quantitativa por se basear em modelos onde relações causais entre as variáveis de entrada e as variáveis de saída são desenvolvidas e testadas; axiomática em função de o principal objetivo é a obtenção de soluções a partir do modelo proposto e assegurar que essas soluções forneçam informações sobre o problema conforme definido no modelo; normativa quando o principal interesse da pesquisa é o desenvolvimento de estratégias e ações para otimizar os resultados existentes na literatura (BERTRAND; FRANSOO, 2002). Em relação à simulação, neste estudo ela pode ser caracterizada como estática, isto é, o fator tempo não é levado em consideração; e como determinística, porque os valores das variáveis do modelo não apresentam flutuações aleatórias (MARIA, 1997).

2.2 ETAPAS DA PESQUISA

Para o cumprimento dos objetivos propostos na seção 1.3 deste estudo, foram executados os seguintes procedimentos:

- a) Pesquisa bibliográfica: com o propósito de mapear modelos prévios de decisão multicritério baseados no FMEA tradicional, foram seguidas as etapas de uma revisão sistemática de literatura; (1) digitação das palavras-chaves e acrônimos “FMEA” AND “RPN” AND (“Multicriteria” OR “Multi-criteria”) nos campos de busca avançada das bases de dados, *Emerald*, *Science Direct*, *Scopus*, *Taylor & Francis*, *Web of Science* e no campo de busca do *Google Scholar*; (2) em todas as bases aplicar um filtro para selecionar estudos publicados entre os anos 2000 e 2019, cuja escolha se deu para a seleção de estudos mais recentes, e também por ser o ano do surgimento do método *Fuzzy-TOPSIS* (CHEN, 2000); (3) selecionar apenas os estudos publicados em periódicos científicos; (4) seleção de estudos publicados somente nos idiomas inglês e português; (5) leitura do título, resumo e do texto para identificação e seleção dos estudos que propõem modelo MCDM baseado no FMEA para apoiar a etapa de avaliação de riscos aplicados em processos de fabricação industriais; (6) eliminação dos estudos que se repetem levando-se em conta a sequência com que aparecem nas bases pesquisadas. As etapas da revisão são aplicáveis em todas as bases de dados exceto, no *Google Scholar* que não permite automaticamente realizar as etapas (3) e (4). Nesse caso, é necessária a consulta manual em todos os resultados da busca para eliminar os artigos que não são de periódicos científicos e os publicados em outro idioma que não sejam o inglês e o português. A opção por utilizar o *Google Scholar* se deu pela quantidade expressiva de publicações retornada com a busca sobre o tema da pesquisa. Vale ressaltar que a realização da revisão sistemática da literatura proporcionou o embasamento teórico-empírico para a elaboração e aplicação do modelo. Os resultados da execução de cada etapa deste procedimento são mostrados na Tabela 1.

Além da etapa de revisão sistemática, a pesquisa bibliográfica foi complementada com artigos de periódicos, livros e normas, que forneceram o embasamento conceitual deste estudo nos temas relacionados com a gestão de riscos, o método FMEA tradicional e os princípios dos métodos de decisão multicritério baseados na lógica *Fuzzy*;

Tabela 1 - Resultados da revisão sistemática de literatura

Base de dados	Número de estudos após cada etapa					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Emerald</i>	47	38	34	34	1	1
<i>Science Direct</i>	219	191	149	149	9	9
<i>Scopus</i>	21	18	15	14	3	1
<i>Taylor & Francis</i>	12	11	11	10	0	0
<i>Web of Science.</i>	16	14	12	12	3	1
<i>Google Scholar</i>	1160	1060	1029	1018	22	13
<i>Totais</i>	1475	1332	1250	1237	38	25

Fonte: Elaborado pelo autor.

- b) Modelagem computacional: envolve a implementação no *Microsoft Excel*[®] para possibilitar que a replicação do modelo *Hesitant Fuzzy-TOPSIS* possa ser executada de maneira efetiva e simplificada. As equações implementadas são baseadas em Beg e Rashid (2013), Cevik Onar, Oztaysi e Kahraman (2014). As escalas linguísticas utilizadas na modelagem foram definidas a partir de Rodriguez, Martinez e Herrera (2012). Já os critérios foram selecionados com base em Certa *et al.* (2017), Chang, Chang e Tsai (2013), Zhao, You e Liu (2017) e Banduka *et al.* (2018);
- c) Pesquisa de campo: com o objetivo de se obter e analisar dados nessa pesquisa, o modelo proposto foi aplicado na avaliação e priorização de riscos em um processo de fabricação industrial. A premissa para escolha da empresa participante é que esta já utilizasse o método FMEA tradicional, como um requisito de seu sistema de gestão. Nesta etapa da pesquisa, o objetivo é a aplicação para testar o modelo proposto em uma situação real onde ocorra a avaliação e priorização de riscos em

- um processo de fabricação industrial. É importante destacar que não houve a intenção de se implementar o modelo na empresa participante;
- d) Análise de sensibilidade: esta análise teve como objetivo a avaliação dos efeitos da variação dos pesos dos critérios na priorização dos modos de falhas (alternativas) e a verificação da consistência dos resultados obtidos na aplicação do modelo proposto.

CAPÍTULO 3: REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta uma visão geral sobre a gestão de riscos em organizações, descreve o método FMEA e inclui as deficiências mais importantes da etapa de avaliação de riscos. Ainda relaciona os modelos prévios de decisão multicritério baseados no método FMEA aplicados em processos de fabricação industrial e descreve os fundamentos dos métodos e técnicas utilizados na proposição do modelo.

3.1 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE GESTÃO DE RISCOS

O significado de risco pode ser diferente de uma pessoa para outra, dependendo do seu ponto de vista, atitude e experiência, o que torna o estudo do risco complexo em razão da ausência de consenso em relação à terminologia (ENNOURI, 2013). Foram adotadas as definições de risco postuladas por Aven e Renn (2009) e pela norma ABNT NBR ISO 31000 (2018), para fornecerem o embasamento conceitual do presente estudo.

Segundo Ennouri (2013) existem diferentes tipos de riscos que podem ser agrupados em diferentes classificações de acordo com a atividade e o ambiente onde a organização está inserida e se esses riscos afetam negativamente ou positivamente o desempenho empresarial. Por exemplo, Hessami (1999) estabeleceu três perspectivas nas quais os riscos invariavelmente podem afetar uma organização:

- a) Dimensões de segurança: referem-se às perdas que envolvem danos às pessoas expostas aos riscos que decorrem de produtos, sistemas e de processos que se manifestam na forma de lesões, doenças ocupacionais ou em casos extremos, a morte;
- b) Dimensões comerciais: referem-se às perdas que envolvem parada de produção, atrasos, danos ao patrimônio, produtos defeituosos, devoluções, recall, publicidade adversa e a insatisfação de clientes;
- c) Dimensões ambientais: referem-se às perdas decorrentes dos danos causados ao meio ambiente por liberação de substâncias nocivas,

imprudência na gestão, exploração predatória de recursos naturais e degradação em geral.

Normalmente essas três perspectivas estão inter-relacionadas e são altamente relevantes para os responsáveis pela tomada de decisão sobre a viabilidade e continuidade do negócio (HESSAMI, 1999). Já Aven (2008) agrupou os tipos de riscos que podem afetar uma organização nas seguintes perspectivas:

- a) Riscos estratégicos: incluem aspectos como planos e estratégias de longo prazo tais como, aquisições e fusões, tecnologia, mercado de trabalho, leis e regulamentações;
- b) Riscos financeiros: incluem a situação financeira na qual o controle está fora da organização como, a oscilação de demanda, escassez de crédito provocado por inadimplência e ausência de liquidez entre outros;
- c) Riscos operacionais: incluem os eventos que afetam o funcionamento normal da organização como, os acidentes de trabalho, problemas de qualidade nos produtos, atos intencionais, perda de competência e processos judiciais por danos ao cliente.

Qualquer que seja a classificação adotada, Schroeder (2014) previu que as organizações irão lidar com mudanças cada vez mais rápidas no mundo dos negócios, um alto grau de incerteza e pressão por revisão em suas estratégias e modelos operacionais, para se manterem competitivas. Novos tipos de riscos surgem oriundos da estrutura organizacional, dos modelos de negócios cada vez mais fluidos, da influência das mídias sociais, da crescente exigência de sustentabilidade social e ambiental (SCHROEDER, 2014).

Aven (2011b) asseverou que nos últimos anos tem ocorrido um crescente interesse das organizações em implementar a gestão de riscos, muito por conta de uma crença de que elas podem explorar tanto as oportunidades, como também podem evitar problemas e perdas. O gerenciamento eficaz dos riscos pode evitar o fracasso do empreendimento e aumentar a possibilidade de sucesso da organização (DEWI; SYAIRUDIN; NIKMAH, 2015). Nos primórdios, os riscos eram tratados com base na intuição e na experiência dos gestores, até que os problemas financeiros no final do século passado, a explosão da *internet* e as

ações judiciais contra vários executivos de grandes empresas americanas e europeias, fomentaram a necessidade de sistematizar o processo da gestão de riscos (WILLIAMS *et al.*, 2006).

Para sistematizar e fornecer um entendimento comum de conceitos, princípios e métodos para realizar a gestão de riscos em organizações, os gestores passaram a ter acesso a padrões e diretrizes internacionais (AVEN, 2012). Vários padrões e diretrizes para a gestão de riscos foram desenvolvidos e disponibilizados. O Quadro 1 apresenta alguns dos padrões mais conhecidos para apoiar a implementação da gestão de riscos. Nesses padrões, é possível constatar diferenças consideráveis no jargão, nas definições e ao mesmo tempo verificar semelhanças importantes quanto aos componentes necessários para a condução do processo da gestão de risco (ALE *et al.*, 2009).

Quadro 1 – Normas e padrões para a gestão de riscos

Padrão	Título	Setor
COSO ERM	<i>Enterprise Risk Management Integrated Framework</i>	Industrial
IRMF	<i>Integrated Risk Management Framework</i>	Governamental
ISO 31.000	<i>Risk Management – Guidelines</i>	Industrial

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Ale *et al.* (2009).

O *Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission* – COSO, é uma organização voluntária do setor privado americano, responsável pela publicação do padrão COSO ERM, que propôs oito componentes necessários para conduzir a gestão de riscos: (a) ambiente interno; (b) estabelecimento de objetivos; (c) identificação de eventos; (d) avaliação de riscos; (e) resposta ao risco; (f) controle de atividades; (g) informação e comunicação e (h) monitoramento (CURKOVIC *et al.*, 2013).

Segundo Mandel (2007), o *Treasure Board of Canada Secretariat*, publicou o padrão IRMF e o descreveu como um guia prático desenvolvido para auxiliar os funcionários do serviço público do Canadá em suas tomadas de decisões. Esse padrão propôs cinco componentes como sendo necessários para a gestão de riscos: (a) identificação de risco; (b) avaliação de riscos; (c) resposta ao risco e (d) monitoramento e avaliação (SANCHEZ *et al.*, 2009).

Para os propósitos deste estudo, selecionou-se o padrão internacional ISO 31000 como referência para apresentar os conceitos e os princípios do processo da gestão de riscos em organizações do setor industrial, por se tratar de um padrão internacional adotado por diversos países, incluindo o Brasil. Este padrão também é capaz de alcançar a consistência e confiabilidade na gestão de riscos, orientando a sua integração com os processos de tomada de decisão em qualquer tipo de organização (PURDY, 2010).

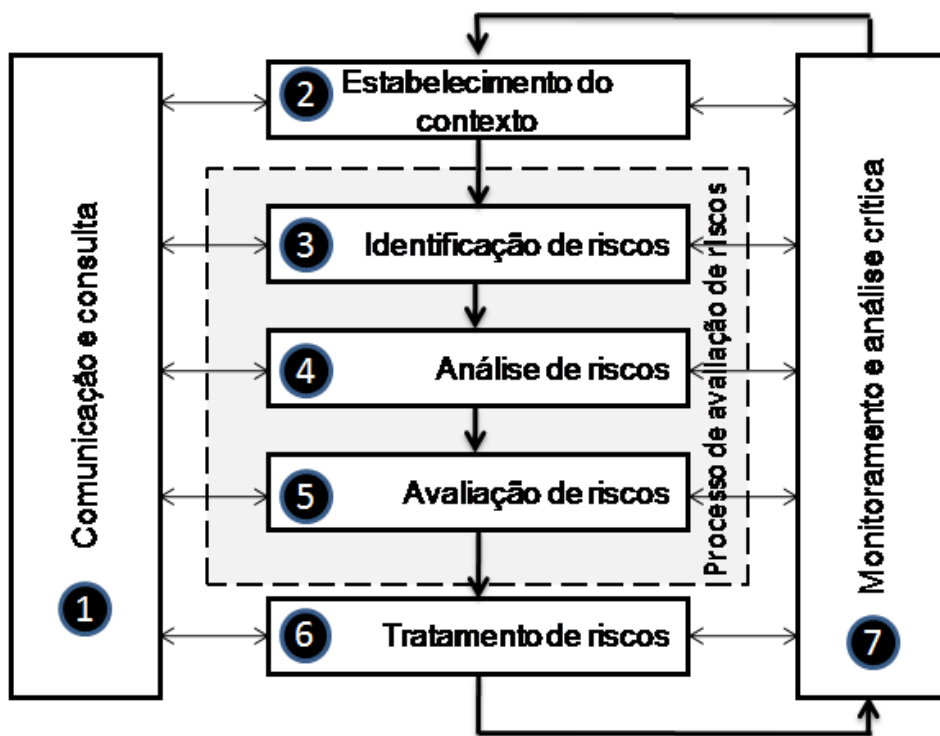
A ISO 31000 *Risk Management - Guidelines* foi elaborada e publicada pela ISO (*International Organization for Standardization*), a qual mantém o TC 262 (*Technical Committee*), cujas atribuições são o estudo, a proposição, consenso, publicação e atualização de normas que estabelecem princípios, diretrizes e técnicas para a gestão de riscos (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2019). A publicação e a atualização de normas brasileiras referentes ao tema gestão de riscos ficam a cargo da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) que se faz representar pela CEE 063 (Comissão Especial de Estudos) nas missões junto ao TC 262 da ISO (ABNT, 2019). Atualizada no ano de 2018, a norma ABNT NBR ISO 31.000 tem seu uso cada vez mais frequente por organizações brasileiras que buscam o reconhecimento de suas boas práticas em gerenciamento de riscos, com o objetivo de gerar e oferecer valor às partes interessadas (ABNT, 2019).

A ABNT NBR ISO 31000 (2018) afirma que organizações que implantam e mantêm a gestão de riscos de acordo com as diretrizes da norma, podem aumentar as chances de atingir seus objetivos por promover uma gestão proativa na identificação e tratamento de riscos. Portanto tanto as perspectivas de riscos em segurança, comerciais e ambientais de Hessami (1999), quanto as perspectivas de riscos estratégicos, financeiros e operacionais de Aven (2008) podem ser gerenciadas sistematicamente. De acordo com a ABNT NBR ISO 31000 (2018), implementação da gestão de riscos tem o potencial tanto de reduzir as perdas quanto de maximizar as oportunidades em função das atividades sistêmicas e de um maior número de controles que reforçam a confiança das partes interessadas, entre outros benefícios.

Em sua configuração a norma organizou e apresentou o tema da gestão de riscos em cinco partes principais (ABNT, NBR ISO 31000, 2018):

- a) Escopo: fornece diretrizes gerais para aplicação da norma nos mais variados contextos;
- b) Termos e definições: define os principais termos e definições utilizados na aplicação da norma;
- c) Princípios: estabelece os princípios fundamentais da gestão de riscos para orientar a todos os níveis da organização;
- d) Estrutura: auxilia a organização a integrar a gestão de riscos aos sistemas já existentes de acordo com suas necessidades;
- e) Processo: descreve detalhadamente os sete componentes (atividades) a serem desenvolvidas na condução do processo da gestão de risco. A Figura 1 detalha a sequência dessas atividades.

Figura 1 - Fluxo de atividades do processo de gestão de riscos



Fonte: (ABNT, NBR ISO 31000, 2018).

Conforme a Figura 1, na atividade 1 é recomendada a implantação de um plano de comunicação e consulta às partes interessadas internas e externas cobrindo todas as fases do processo da gestão de riscos. Na atividade 2 é recomendado que a organização estabeleça o contexto no qual são desdobrados

os objetivos, definidos os parâmetros, o escopo e os critérios de risco a serem considerados. A atividade 3 inaugura o processo global de avaliação de risco recomendando que a organização identifique as fontes de risco, as áreas de impacto, os eventos com suas causas e consequências potenciais. A atividade 4 recomenda uma total compreensão dos riscos identificados por meio da apreciação das fontes de riscos, suas causas e consequências, e da probabilidade de que as consequências venham a ocorrer. Recomenda ainda, a verificação da existência de controles e de sua eficácia frente aos riscos identificados, possibilitando a determinação de um nível de risco a partir desses fatores (ABNT, NBR ISO 31000, 2018).

A atividade 5 encerra o processo global de avaliação de risco por meio da comparação do nível de risco obtido na atividade 4 com os critérios de risco previamente definidos na atividade 2. Esta atividade auxilia a tomada de decisão sobre a disposição e a prioridade para implementação do tratamento com base nos níveis de risco. A atividade 6 recomenda que os riscos sejam tratados de acordo com sua magnitude e podem ser selecionadas a partir da norma, várias opções de tratamento dependendo das circunstâncias. A atividade 7, a exemplo da atividade 1, recomenda que a organização implemente o monitoramento e análise crítica, cobrindo todas as fases do processo da gestão de riscos, e que estes sejam realizados periodicamente para assegurar a continuada eficácia da gestão de riscos (ABNT, NBR ISO 31000, 2018).

A comissão CEE 063 da ABNT, responsável pelo estudo do tema gestão de riscos publicou em 2012 a Norma NBR ISO/IEC 31010 “Gestão de risco – técnicas para o processo de avaliação de riscos” (ABNT, 2019). Esta norma apresenta um conjunto de 31 métodos e técnicas que podem ser selecionadas para a condução do processo da gestão de riscos no contexto de desenvolvimento de novos produtos, processos de fabricação industrial, prevenção de acidentes do trabalho, danos ambientais, entre outros. Ainda segundo a norma ABNT NBR ISO/IEC 31010 (2012), a Análise do Modo e Efeito da Falha (*Failure Mode and Effect Analysis*, FMEA) é um dos métodos mais recomendados para a condução do processo global de avaliação de riscos, composto de identificação, análise e avaliação de riscos em geral.

3.1.1 A gestão de riscos em processos de fabricação industrial

Chang e Cheng (2010) alertam para a crescente pressão sobre as organizações fabris pela constante necessidade de se manterem competitivas. Esse cenário exige a maximização do desempenho em todos os processos da organização para reduzir a ocorrência de falhas que possam acarretar um alto custo devido a atrasos, baixa qualidade dos produtos, acidentes, entre outros tipos de perdas (GARCIA; GILABERT, 2011).

A gestão de risco nos processos fabris pode auxiliar os gestores na tarefa de mitigar ou eliminar a ocorrência de falhas já a partir do projeto e do desenvolvimento de um novo processo de fabricação que resultará em um produto (DEWI; SYAIRUDIN; NIKMAH, 2015). Projetar e desenvolver produtos envolve análise crítica e tomada de decisão sobre a viabilidade do projeto em relação à capacidade da organização em atender os requisitos e especificações dos clientes, requisitos de produção, nível tecnológico, recursos humanos, entre outros (CHIN; CHAN; YANG, 2008). Puente *et al.* (2002) discorrem sobre a importância de uma adequada avaliação de risco nos estágios iniciais de um projeto e apresentam os benefícios alcançados em relação ao atendimento das especificações do cliente, redução de tempo e custos de lançamento, aumento do nível de qualidade e da confiabilidade dos processos e do produto, o que promove uma maior segurança e responsabilidade de todos os envolvidos durante a fabricação.

A Norma ABNT NBR ISO 9001:2015 “Sistema de Gestão da Qualidade” estabeleceu o conceito da mentalidade de riscos para ser aplicado no planejamento e na implementação dos processos de gestão da qualidade das organizações. Fatores como, qualidade de um produto, o tempo de respostas à demanda do cliente e um preço aceitável, estão diretamente relacionados com os processos de fabricação (BANDUKA *et al.*, 2018). Para Ahmadi, Molana e Sajadi (2017), o fator qualidade de um produto depende de como a organização pode prevenir e superar os riscos de falhas durante os procedimentos de fabricação e/ou montagem. Assim sendo, a organização deve adotar sistemas que evitem erros e garantam a manutenção da qualidade em seus processos de fabricação (NUCHPHO; NANSAARNG; PONGPULLPONSAK, 2019).

Nos processos de fabricação estão também presentes os riscos relacionados com a segurança do trabalho e ao meio ambiente. Pillay e Wang (2003) ressaltam a importância da avaliação de riscos, por meio da identificação de componentes críticos de um sistema produtivo, cuja falha pode provocar acidentes, impactos ao meio ambiente, danos ao patrimônio e perdas financeiras. Ainda segundo os autores, a adoção do processo global de avaliação de risco tem como objetivo tornar os sistemas produtivos mais seguros e mais confiáveis. Nesse contexto, Zhao, You e Liu (2017) asseveram que a adoção do método FMEA permite que sejam avaliados e previstos os riscos em processos de fabricação industriais de forma antecipada e que ações possam reduzir ou eliminar os modos de falhas potenciais.

Para Ghouschi, Yousefi e Khazaeili (2019), a adoção do método FMEA com a efetiva tomada de ação preventiva no curso do projeto do produto ou no estágio preliminar do processo de fabricação, pode reduzir os custos e o tempo gasto, quando comparado com as ações tomadas após o início da fabricação. Em suma, nos ambientes atuais de fabricação, os processos se tornaram mais complexos, mais rápidos e apresentam uma infinidade de variáveis que uma vez não controladas, podem afetar negativamente os objetivos relacionados com a segurança, o meio ambiente a qualidade do produto e a satisfação do cliente (SUSTEROVA; LAVIN; RIIVES, 2012). Dessa forma, evidencia-se a importância da adoção de métodos para gerenciar de maneira adequada, os riscos advindos dessas variáveis presentes nos processos de fabricação.

3.2 O MÉTODO FMEA

O FMEA é um dos métodos mais aplicados para identificação, análise, avaliação e eliminação ou mitigação de falhas potenciais ou conhecidas, podendo geralmente ser aplicado em sistemas, projetos, processos ou serviços (CHANG; WEN; CHUNG, 2018; LO; LIOU, 2018). Sua aplicação permite melhorar a segurança, a confiabilidade e apoiar a tomada de decisão (LIU; LIU; LIU, 2013). O FMEA suporta a avaliação de riscos e o desenvolvimento de ações preventivas e corretivas para sistematizar a análise de falhas e vem sendo aplicado em muitos segmentos principalmente na indústria automotiva, aeroespacial, bélica, eletrônica, tecnologias médicas, dentre outras (CARPINETTI, 2016). Segundo

Chang, Wen e Chung (2018), o FMEA é considerado um método muito importante para conduzir exames analíticos e também aparece como requisito das principais normas internacionais como, a IATF 16949 que trata de requisitos para aplicação da ISO 9001 na cadeia automotiva, a MIL-STD-1629, a IEC 60812 entre outras. Banduka *et al.* (2018), asseverou que o método FMEA tem sido aplicado desde 1993 pela Ford, Chrysler e General Motors onde quer que tenham fábricas no mundo. Liu, Liu e Liu (2013) e Carpinetti (2016) sugerem que o FMEA seja aplicado conforme as três etapas indicadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Descrição das etapas de aplicação do FMEA

Etapa I
<ul style="list-style-type: none"> a) Especificar o sistema, projeto ou processo sob estudo; b) Formar equipe de especialistas; c) Definir os requisitos do processo ou as funções dos componentes do produto; d) Identificar os modos de falhas potenciais ou conhecidos; e) Analisar e descrever os efeitos de cada modo de falha e avaliar sua severidade (S); f) Investigar e definir as causas prováveis de cada modo de falha e avaliar a ocorrência (O) dessas causas; g) Verificar os controles existentes e avaliar a capacidade de detecção (D) dos modos de falhas por estes recursos; h) Calcular o RPN usando a Equação 1.
Etapa II
<ul style="list-style-type: none"> a) Ordenar decrescentemente os valores de RPN. b) Elaborar um plano de ações preventivas ou corretivas.
Etapa III
<ul style="list-style-type: none"> a) Implementar o plano de ações; b) Avaliar a eficácia destas ações, executando uma nova avaliação dos modos de falha.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Liu, Liu e Liu (2013) e Carpinetti (2016).

Na etapa I, os especialistas recorrem às informações disponíveis e realizam sessões de “*brainstorming*” sobre os possíveis modos de falhas em um sistema, projeto ou processo sob estudo. Dessa forma, identificam os modos de falhas potenciais ou conhecidos, assim como analisam e descrevem os efeitos destes modos de falhas. Em seguida, os especialistas discutem as causas prováveis e os meios existentes para detecção do modo de falha caso este venha a ocorrer. Para cada modo de falha identificado, deve ser atribuída uma pontuação relativa aos

critérios: severidade (S), que quantifica a gravidade do efeito, de acordo com o Quadro 3; da ocorrência (O), relacionada à probabilidade, de acordo com o Quadro 4; e a detecção (D), que avalia os meios de controles existentes, por meio do Quadro 5. O último passo da etapa I consiste no cálculo do número de prioridade de risco (*Risk Priority Number*, RPN) por meio da Equação 1.

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

Quadro 3 - Escala para classificação da severidade de um modo de falha

Efeito	Severidade do Efeito	Classificação
Perigoso	A falha é perigosa e ocorre sem aviso. Ela interrompe o funcionamento do sistema e/ou envolve o não atendimento à legislação	10
Grave	A falha envolve resultados perigosos e/ou descumprimento de regulamentos ou normas governamentais	9
Extremo	O produto está inoperante com perda da função principal. O sistema está inoperante.	8
Maior	O desempenho do produto é gravemente afetado, mantendo o funcionamento. O sistema pode não operar	7
Significante	O desempenho do produto é degradado. Funções de conforto ou conveniência podem não funcionar	6
Moderado	Efeito moderado no desempenho do produto. O produto requer reparo	5
Baixo	Efeito pequeno no desempenho do produto. O produto não requer reparo	4
Menor	Efeito pequeno no desempenho do produto ou do sistema	3
Muito menor	Efeito muito pequeno no desempenho do produto ou do sistema	2
Nenhum	Sem efeito	1

Fonte: Elaborado a partir de Liu, Liu e Liu (2013).

Quadro 4 - Escala para classificação da ocorrência de um modo de falha

Probabilidade de falha	Taxa de falha possível	Classificação
Extremamente alta: falha quase inevitável	\geq em 2	10
Muito alta	1 em 3	9
Falhas repetidas	1 em 8	8
Alta	1 em 20	7
Moderadamente alta	1 em 80	6
Moderada	1 em 400	5
Relativamente baixa	1 em 2.000	4
Baixa	1 em 15.000	3
Remota	1 em 150.000	2
Quase impossível	\leq 1 em 1.500.000	1

Fonte: Elaborado a partir de Liu, Liu e Liu (2013).

Quadro 5 - Escala para classificação da detecção de um modo de falha

Detecção	Probabilidade de detecção por controle de projeto	Classificação
Incerteza absoluta	O controle de projeto não detecta uma possível causa de falha ou modo de falha subsequente ou não existe controle de projeto	10
Muito remota	Possibilidade muito remota do controle de projeto detectar uma possível causa de falha ou modo de falha subsequente	9
Remota	Possibilidade remota do controle de projeto detectar uma possível causa de falha ou modo de falha subsequente	8
Muito baixa	Possibilidade muito baixa do controle de projeto detectar uma possível causa de falha ou modo de falha subsequente	7
Baixa	Pouca chance do controle de projeto detectar uma possível causa de falha ou modo de falha subsequente	6
Moderada	Possibilidade moderada do controle de projeto detectar uma possível causa de falha ou modo de falha subsequente	5

Moderadamente alta	Possibilidade moderadamente alta do controle de projeto detectar uma possível causa de falha ou modo de falha subsequente	4
Alta	Possibilidade alta do controle de projeto detectar uma possível causa de falha ou subsequente modo de falha	3
Muito alta	Possibilidade muito alta do controle de projeto detectar uma possível causa de falha ou modo de falha subsequente	2
Quase certa	O controle de projeto quase certamente detectará uma possível causa de falha ou modo de falha subsequente	1

Fonte: Elaborado a partir de Liu, Liu e Liu (2013).

Conforme descrito no Quadro 2, os valores resultantes do cálculo do RPN para cada falha são ranqueados em ordem decrescente. A classificação do RPN determina o nível de prioridade da falha. Os especialistas envolvidos na análise do processo devem elaborar e implantar planos de ações para eliminar ou mitigar as causas potenciais das falhas prioritárias, isto é, com o valor de RPN mais alto. Finalmente, na etapa III, os modos de falhas são reavaliados por meio da Equação 1 para verificar a eficácia das ações implementadas. Caso as ações tenham sido eficazes, é esperado que ocorra a redução do valor do RPN em relação ao resultado inicial. O novo ranqueamento dos modos de falha direciona as próximas ações de melhoria do processo (LIU; LIU; LIU, 2013; CARPINETTI, 2016).

3.2.1 Problemas da etapa de avaliação de riscos do método FMEA

Embora seja um método bastante aceito e amplamente utilizado, o FMEA vem recebendo diversas críticas por parte da academia em estudos como Certa *et al.* (2017) e Delice e Can (2017), nos quais são listados os principais problemas da etapa de avaliação de riscos do FMEA. No presente estudo, por meio de uma revisão sistemática de literatura nas bases de dados, *Emerald*, *Science Direct*, *Scopus*, *Taylor & Francis*, *Web of Science* e no *Google Scholar* no período de 2000 a 2019, com o foco na identificação de modelos prévios de decisão multicritério baseados em FMEA efetivamente aplicados em processos de fabricação industrial, foi possível identificar também os principais problemas da versão tradicional do método FMEA. Todos os problemas identificados nesta

pesquisa estão relacionados à etapa de avaliação de riscos, composta pelo procedimento da pontuação dos modos de falhas em relação aos critérios e do cálculo do número de prioridade de risco (NPR). No Quadro 6 estão descritos os problemas mais recorrentes na literatura do FMEA.

Quadro 6 - Principais problemas da etapa de avaliação de riscos do FMEA

Descrição	Autores	Quantidade de estudos
A importância relativa entre os critérios, severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D), não é levada em consideração	Banduka <i>et al.</i> (2018) Bozdag <i>et al.</i> (2015) Can (2018) Cao e Deng (2019) Certa <i>et al.</i> (2017) Chang, Chang e Tsai (2013) Chen (2017) Delice e Can (2017) Ekmekçioğlu e Kutlu (2012) Fattahi e Khalilzadeh (2018) Geramian, Mehregan e Mokhtarzadeh (2017) Hajimolaali <i>et al.</i> (2017) Haq <i>et al.</i> (2015) Kutlu e Ekmekçioğlu (2012) Li <i>et al.</i> (2019) Li, Wang e Chin (2019) Li e Chen (2019) Mahmoodi e Mirzazadeh (2014) Nuchpho, Nansaarnng e Pongpullponsak (2019) Rezaee <i>et al.</i> (2018) Zhao, You e Liu (2017)	21
Diferentes conjuntos de pontuações para “S”, “O” e “D” podem produzir exatamente o mesmo valor de RPN, mas as implicações de risco ocultas podem ser totalmente diferentes	Bozdag <i>et al.</i> (2015) Can (2018) Cao e Deng (2019) Certa <i>et al.</i> (2017) Chang, Chang e Tsai (2013) Chen (2017) Delice e Can (2017) Ekmekçioğlu e Kutlu (2012) Fattahi e Khalilzadeh (2018) Geramian, Mehregan e Mokhtarzadeh (2017)	18

	<p>Haq <i>et al.</i> (2015) Kutlu e Ekmekçioğlu (2012) Li <i>et al.</i> (2019) Li, Wang e Chin (2019) Li e Chen (2019) Mahmoodi e Mirzazadeh (2014) Mutlu e Altuntas (2019) Zhao, You e Liu (2017)</p>	
Os critérios “S”, “O” e “D” são geralmente difíceis de serem precisamente avaliados com o uso de valores numéricos determinísticos, que não permitem quantificar medidas incertas ou imprecisas	<p>Ahmadi, Molana e Sajadi (2017) Can (2018) Certa <i>et al.</i> (2017) Chang, Chang e Tsai (2013) Chen (2017) Delice e Can (2017) Ekmekçioğlu e Kutlu (2012) Hajimolaali <i>et al.</i> (2017) Haq <i>et al.</i> (2015) Kutlu e Ekmekçioğlu (2012) Li <i>et al.</i> (2019) Li, Wang e Chin (2019) Li e Chen (2019) Maleki e Saadat (2013) Mutlu e Altuntas (2019) Rezaee <i>et al.</i> (2018) Zhao, You e Liu (2017)</p>	17
A fórmula matemática para calcular o RPN é questionável. Não há razão para “S”, “O” e “D”, serem multiplicados para produzir o RPN	<p>Bozdog <i>et al.</i> (2015) Certa <i>et al.</i> (2017) Chang, Chang e Tsai (2013) Chen (2017) Delice e Can (2017) Ekmekçioğlu e Kutlu (2012) Haq <i>et al.</i> (2015) Kutlu e Ekmekçioğlu (2012) Li e Chen (2019) Mahmoodi e Mirzazadeh (2014) Maleki e Saadat (2013) Rezaee <i>et al.</i> (2018) Zhao, You e Liu (2017)</p>	13
No cálculo do RPN são considerados apenas três	<p>Banduka <i>et al.</i> (2018) Certa <i>et al.</i> (2017)</p>	8

fatores “S”, “O” e “D” principalmente em termos de segurança. Outros fatores importantes como aspectos econômicos ou perdas de produção são ignorados	Chang, Chang e Tsai (2013) Delice e Can (2017) Li <i>et al.</i> (2019) Li e Chen (2019) Yousefi <i>et al.</i> (2018) Zhao, You e Liu (2017)	
Pequena variação em um dos critérios altera drasticamente o valor de RPN. Exemplo: Se “O” e “D” forem pontuados com 10 e “S” receber 1 ponto, o RPN será de 100 pontos. Por outro lado, se “O” e “D” forem ambos pontuados com 2, 1 ponto em “S” irá gerar uma variação de apenas 4 pontos no RPN	Bozdag <i>et al.</i> (2015) Certa <i>et al.</i> (2017) Delice e Can (2017) Li <i>et al.</i> (2019) Li e Chen (2019) Mutlu e Altuntas (2019)	6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o objetivo de contornar ou superar os problemas listados no Quadro 6, bem como melhorar o desempenho da etapa de avaliação de riscos do FMEA quando aplicado em processos de fabricação industrial, cada vez mais estudos vêm propondo sua combinação com métodos de decisão multicritério (MCDM) (ZHAO; YOU; LIU, 2017).

3.2.2 Aplicações do FMEA combinado com métodos MCDM em processos de fabricação industrial

De acordo com Liu *et al.* (2019), é crescente na literatura a motivação dos pesquisadores na proposição de técnicas e teorias alternativas para o aprimoramento do FMEA tradicional. Os métodos MCDM se apresentam como solução para problemas de decisão em que estão envolvidos critérios qualitativos e quantitativos e pelo menos duas alternativas (GUARNIERI, 2015). A abordagem que combina métodos MDCM para apoiar a avaliação e a priorização de riscos tem sido a mais difundida na literatura do FMEA (LIU *et al.*, 2019)

Segundo Ahmadi, Molana e Sajadi (2017), os métodos MCDM podem ser subdivididos em dois tipos: MODM (*Multi-Objectives Decision Making*) e MADM (*Multi-Attribute Decision Making*). Enquanto os métodos MODM focam em

problemas de otimização, os métodos MADM realizam o ranqueamento de alternativas predefinidas. Maleki e Saadat (2013) recomendam que a escolha e aplicação de uma técnica MCDM sejam precedidas de ampla pesquisa em função da existência de variados axiomas e diferentes lógicas. Qualquer que seja a técnica MCDM escolhida, estarão presentes os benefícios de uso e limitações. Em função disso, alguns estudos combinam duas ou mais técnicas a fim de usufruir de benefícios específicos advindos de cada uma delas (LIMA JR.; OSIRO; CARPINETTI, 2013).

No Quadro 7 são apresentados os estudos prévios identificados na revisão sistemática da literatura, destacando as técnicas de decisão utilizadas em cada um deles. Em todos esses estudos foram utilizados o FMEA tradicional como base, combinado com uma ou mais técnicas MCDM para apoiar a etapa da avaliação e estabelecer a priorização dos riscos. Devido ao recorte da presente pesquisa, foram incluídos apenas os estudos com aplicação efetiva em processos de fabricação industrial.

Quadro 7 - Estudos com modelos prévios baseados em FMEA

Proposto por:	Técnica(s) Utilizada(s)	Breve descrição
Ekmekçioğlu e Kutlu (2012)	<i>Fuzzy-AHP (Analytic Hierarchy Process) e Fuzzy-TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)</i>	Aplicação de variáveis linguísticas para determinação de “S”, “O” e “D” em um processo de fabricação de uma indústria de autopeças
Kutlu e Ekmekçioğlu (2012)	<i>Fuzzy-AHP (Analytic Hierarchy Process) e Fuzzy-TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)</i>	Aplicação de modelo híbrido em ambiente <i>fuzzy</i> em um processo de montagem de uma indústria de autopeças
Chang, Chang e Tsai (2013)	GRA (<i>Grey Relational Analysis</i>) e DEMATEL (<i>Decision-making and Trial Evaluation Laboratory</i>)	Demonstração das relações entre modos de falhas e causas para priorização em um processo de montagem de componentes eletrônicos
Maleki e Saadat (2013)	AHP (<i>Analytic Hierarchy Process</i>) e REMBRANDT System	Demonstração da inversão de <i>ranking</i> e da proposta de solução aplicada em um processo de fabricação de bombas hidráulicas
Mahmoodi e Mirzazadeh	<i>Fuzzy-TODIM (Interactive Multi-Criteria Decision Making) e FTF (Fuzzy Time</i>	Análise de falhas em um processo de fabricação de uma indústria

(2014)	<i>Function)</i>	automotiva
Bozdag <i>et al.</i> (2015)	<i>Interval Type 2 Fuzzy Sets</i>	Melhoria na modelagem de incertezas em um processo de montagem de uma indústria de autopeças
Haq <i>et al.</i> (2015)	<i>FST (Fuzzy Set Theory)</i>	Reconhecimento de possíveis falhas em diferentes fases do ciclo de vida dos sistemas de automação na linha de montagem de motores Ford Motor Company
Ahmadi, Molana e Sajadi (2017)	<i>TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)</i>	Eliminação dos efeitos da subjetividade na avaliação de falhas em uma etapa do processo de fabricação de aços
Certa <i>et al.</i> (2017)	<i>ELECTRE TRI (Elimination and Choice Expressing Reality)</i>	Avaliação e ranqueamento dos modos de falhas às classes de riscos predefinidas no processo de fabricação de uma indústria de laticínios
Chen (2017)	<i>Fuzzy-ISM (Interpretive Structural Model), DEMATEL (Decision-making and Trial Evaluation Laboratory) e ANP (Analytic Network Process)</i>	Obtenção de maior acuracidade dos pesos dos fatores de riscos para melhoria da qualidade em processo de fabricação de notebooks
Delice e Can (2017)	<i>MABAC (Multi-Atributive Boarder Approximation Area Comparison)</i>	Priorização de riscos de segurança e saúde ocupacional em uma linha de montagem de uma empresa fabricante sistemas eletromecânicos de alta voltagem
Geramian, Mehregan e Mokhtarzadeh (2017)	<i>FIS (Fuzzy Inference System)</i>	Melhorias no processo de fabricação de portas em uma indústria automotiva
Hajimolaali <i>et al.</i> (2017)	<i>Fuzzy-TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)</i>	Identificação e classificação dos riscos relacionados à qualidade nos processos de fabricação da indústria farmacêutica
Zhao, You e Liu (2017)	<i>IVIFS (Interval-valued Intuitionistic Fuzzy Set) e MULTIMOORA (Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis)</i>	Redução da incerteza e subjetividade da equipe na avaliação de riscos em um processo de fabricação de aço

Banduka <i>et al.</i> (2018)	FST (<i>Fuzzy Set Theory</i>)	Avaliação de risco considerando critérios adicionais e pesos individuais para cada um desses critérios aplicado em um processo de fabricação de bancos de couro para a indústria automotiva
Can (2018)	IFT (<i>Intuitionistic Fuzzy Set</i>) e WASPAS (<i>Weighted Aggregated Sum Product Assessment</i>)	Priorização de riscos de segurança e saúde ocupacional em uma linha de montagem de uma empresa fabricante sistemas eletromecânicos de alta voltagem
Fattahi e Khalilzadeh (2018)	<i>Fuzzy-AHP (Analytic Hierarchy Process) e Fuzzy-MULTIMOORA (Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis)</i>	Avaliação de risco dos acidentes ocupacionais em uma siderúrgica
Rezaee <i>et al.</i> (2018)	<i>Multi-stage FCM (Fuzzy Cognitive Method)</i>	Avaliação e priorização de riscos no processo de produção de uma indústria alimentícia
Yousefi <i>et al.</i> (2018)	RDEA (<i>Robust Data Envelopment Analysis</i>)	Avaliação e priorização de riscos à segurança, saúde e meio ambiente em uma fábrica de peças de reposição do segmento automotivo
Cao e Deng (2019)	<i>Fuzzy probability distribution</i>	Redução da incerteza e subjetividade da equipe na avaliação de riscos em um processo de produção de chapas de aço
Li <i>et al.</i> (2019)	AHP (<i>Analytic Hierarchy Process</i>) e <i>Fuzzy comprehensive evaluation</i>	Otimização do processo de fabricação de engrenagens em uma indústria metalúrgica
Li, Wang e Chin (2019)	IVIFS (<i>Interval-valued Intuitionistic Fuzzy Set</i>) e MULTIMOORA (<i>Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis</i>)	Redução da incerteza e subjetividade da equipe na avaliação de riscos em um processo de produção de chapas de aço
Li e Chen (2019)	<i>Fuzzy belief structure</i> e GRPM (<i>Grey relational projection method</i>)	Avaliação de risco do processo de fabricação de chapas de aço em uma siderúrgica
Mutlu e Altuntas (2019)	FTA (<i>Fault Tree Analysis</i>) e BIFPET (<i>Belief in Fuzzy Probability Estimation of Time</i>)	Análise e Avaliação de riscos no processo de acabamento de uma indústria têxtil
Nuchpho,	FST (<i>Fuzzy Set Theory</i>)	Melhoria do processo de fabricação

Nansaarnge e Pongpullponsak (2019)		para redução de defeitos em produtos processados de aves em uma indústria alimentícia
------------------------------------	--	---

Fonte: Elaborado pelo autor.

Do ponto de vista do foco das aplicações, os estudos apresentaram os seguintes objetivos; (a) 68% deles estão voltados para a melhoria dos processos de fabricação; (b) 12% para a garantia da qualidade do produto; (c) 20% voltados para a melhoria das condições de segurança e saúde nos processos de fabricação. Os tipos de riscos identificados nas aplicações dos estudos estão distribuídos em: 84% na dimensão comercial, 16% na dimensão de segurança e nenhuma aplicação na dimensão ambiental, de acordo com a classificação de Hessami (1999). Já na classificação de Aven (2008) os tipos de riscos identificados nas aplicações, estão distribuídos em 100% na dimensão operacional, portanto nenhuma aplicação foi observada nas dimensões estratégica e financeira dos riscos.

Delice e Can (2017) asseveram que o processo de avaliação de riscos realizado com um número cada vez maior de especialistas multifuncionais, contribui para a melhoria de sua eficácia. Entretanto, em mais da metade dos modelos analisados (56%) a possibilidade da participação de múltiplos decisores não está presente.

Dentre os 25 estudos descritos no Quadro 7, 20 consideram apenas os três critérios de decisão tradicionalmente usados no FMEA: severidade, ocorrência e detecção. O modelo proposto por Banduka *et al.* (2018), além dos três critérios tradicionais, incluem também um fator relacionado aos custos internos e externos provocados pelos modos de falhas e outro relacionado à segurança. Delice e Can (2017) propõem a utilização de seis critérios no modelo que incorpora além dos três tradicionais do FMEA, o critério de custo, tempo de exposição e segurança do sistema. Os critérios custo e duração do tratamento foram adotados juntamente com os critérios tradicionais por Yousefi *et al.* (2018) Também Fattahi e Khalilzadeh (2018) adicionaram aos tradicionais os critérios, tempo, custo e lucro. Já o modelo de Li, Wang e Chin (2019) utiliza os critérios, importância, dificuldade de mudança, racionalidade e dificuldade de detecção.

Em relação às técnicas de decisão, 19 estudos apresentaram abordagens baseadas na teoria dos conjuntos *fuzzy* (FST), o que parece estar relacionado à sua capacidade de apoiar decisões sob incerteza. Ao contrário dos estudos propostos por Chang, Chang e Tsai (2013), Maleki e Saadat (2013), Ahmadi, Molana e Sajadi (2017), Certa *et al.* (2017), Delice e Can (2017) e Yousefi *et al.* (2018), os modelos baseados em FST possibilitam utilizar variáveis linguísticas para avaliar os elementos do problema. Nota-se também uma ampla diversidade de combinações entre técnicas de decisão. Chen (2017) combinou o FMEA com os métodos *Fuzzy*-ISM, DEMATEL e ANP. Mahmoodi e Mirzazadeh (2014) aplicaram *Fuzzy*-TODIM com FTF. Ekmekçioğlu e Kutlu (2012) e Kutlu e Ekmekçioğlu (2012) sugerem o uso combinado do *Fuzzy*-AHP com *Fuzzy*-TOPSIS.

Embora os modelos baseados em *Fuzzy*-TOPSIS (EKMEKÇIOĞLU; KUTLU, 2012; KUTLU; EKMEKÇIOĞLU, 2012) tenham trazido contribuições significativas para a literatura deste tema, o uso combinado com *Fuzzy*-AHP para determinação dos pesos dos critérios pode implicar em limitações como: (1) dificuldade de garantir a consistência por meio de julgamentos comparativos, requerendo a realização de vários testes de consistência; (2) necessidade de uma quantidade maior de julgamentos, o que implica em investir mais esforços para coleta de dados; (3) possibilidade de obter pesos nulos para os critérios, o que faz com que as pontuações das falhas no critério com peso zero não sejam consideradas no cálculo do RPN (LIMA-JR.; CARPINETTI, 2020). Vale ressaltar que as duas primeiras limitações apontadas também são válidas para modelos baseados em outras técnicas que requerem comparações pareadas entre os critérios e alternativas, como AHP (MALEKI; SAADAT, 2013) e ANP (CHEN, 2017).

O modelo proposto por Hajimolaali *et al.* (2017), que utiliza apenas o método *Fuzzy*-TOPSIS para avaliação dos pesos dos critérios e das pontuações das alternativas, não é afetado por tais limitações. Entretanto, assim como os modelos desenvolvidos por Ekmekçioğlu e Kutlu (2012) e Kutlu e Ekmekçioğlu (2012), considera apenas os três critérios tradicionalmente usados pelo FMEA, sem incluir os custos relacionados à falha. Além disso, nenhum dos modelos apresentados nesta seção se mostra adequado para apoiar decisões em situações de hesitação, nas quais os decisores preferem exprimir seus

juízos utilizando expressões linguísticas ou mais de um termo linguístico. Portanto, o desenvolvimento do modelo proposto pelo presente estudo visa contornar essas limitações.

3.3 DESCRIÇÃO DO MÉTODO UTILIZADO

3.3.1 Introdução à Teoria dos Conjuntos *Fuzzy*

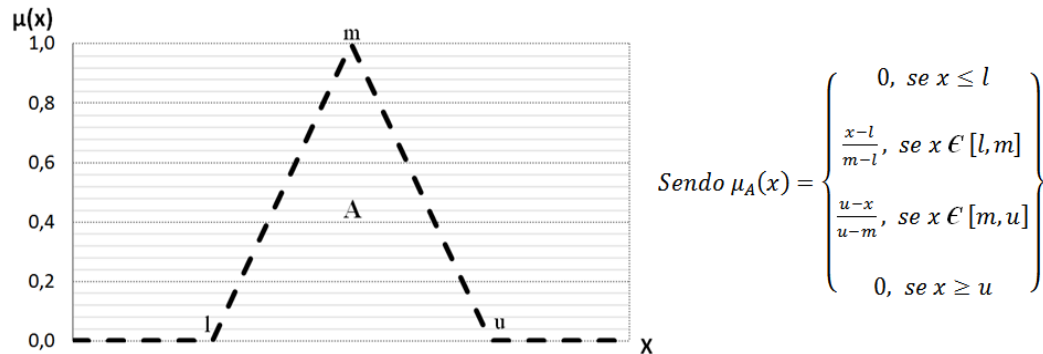
A teoria dos conjuntos *fuzzy* (*Fuzzy Set Theory* – FST) foi criada por Zadeh (1965) para permitir a modelagem de sistemas com categorias de elementos cujas fronteiras são consideradas incertas (LIMA JR.; CARPINETTI, 2015). Um conjunto *fuzzy* é modelado por uma função de pertinência $\mu_A(x): X \rightarrow [0,0,1,0]$, que possibilitam níveis parciais de pertinência. Enquanto na teoria dos conjuntos clássica, cada conjunto é definido usando uma função $\mu_A(x): X \rightarrow \{0,0,1,0\}$, na lógica *fuzzy* a função $\mu_A(x)$ inclui valores no intervalo contínuo $[0,0,1,0]$. Dessa forma considera-se a existência de níveis intermediários entre o “falso” ($\mu_A(x) = 0$) e o “verdadeiro” ($\mu_A(x) = 1$) (ZADEH, 1965; PEDRYCZ; GOMIDE, 2007; LIMA JR.; CARPINETTI, 2015).

Uma variável linguística é aquela cujos valores são sentenças definidas em linguagem natural ou artificial (ZADEH, 1973). Seu uso implica na escolha de um conjunto de termos linguísticos a fim de quantificar seus valores de maneira apropriada. Como exemplo, ao realizar a análise de falhas do FMEA utilizando o método *Fuzzy-TOPSIS* desenvolvido por Chen (2000), o valor da variável linguística “severidade” pode ser medido por meio dos termos linguísticos “baixa”, “média” e “alta”.

Termos linguísticos são representados por números *fuzzy*, cuja função de pertinência pode possuir diferentes formatos, como triangular, sigmoidal ou trapezoidal. Como mostrado na Figura 2, um número *fuzzy* triangular pode ser escrito por meio de seus vértices (l, m, u), sendo que m representa um valor *crisp* central, l é o limite inferior e u é o limite superior. Os números triangulares são frequentemente utilizados devido a uma maior simplicidade nos cálculos envolvidos. Além disso, as funções do tipo triangular são mais sensíveis do que as funções trapezoidais para responder a variações nos valores de x (PEDRYCZ; GOMIDE, 2007; KAHARAMAN, 2008; LIMA JR.; CARPINETTI, 2015). Pedrycz e

Gomide (2007) explicam que as operações algébricas envolvendo dois números triangulares são feitas em função dos valores de l , m e u .

Figura 2 - Número fuzzy triangular



Fonte: Pedrycz e Gomide (2007).

3.3.2 Fundamentos dos Conjuntos *Hesitant Fuzzy*

Os conjuntos *hesitant fuzzy* (*Hesitant Fuzzy Sets* – HFS) são uma das recentes extensões da teoria dos conjuntos *fuzzy* de Zadeh (1965). Essa abordagem foi desenvolvida por Torra (2010) para modelar incertezas geradas por hesitação que surgem para designar os graus de associação dos elementos (SENVAR; OTAY; BOLTURK, 2016).

Torra (2010) asseverou que o desenvolvimento do *hesitant fuzzy* foi motivado em razão de que, ao se definir a associação de um elemento, a dificuldade de se estabelecer o grau dessa associação ocorre não porque existe uma margem de erro ou alguma distribuição de possibilidades nos valores, mas sim porque existe um conjunto de valores possíveis. Torra (2010) restringe o grau de adesão de um elemento a um conjunto de múltiplos valores possíveis entre zero e um. Rodriguez, Martinez e Herrera (2012) ratificam que os conjuntos *fuzzy* comuns são limitados para modelagem de problemas de decisão nas quais duas ou mais fontes de imprecisão aparecem simultaneamente. Nessas situações, a representação linguística do *hesitant fuzzy* pode assumir intervalos como exemplo “entre muito ruim e ruim”, “entre muito baixo e médio”, dentre outros termos frequentes em processos de tomada de decisão.

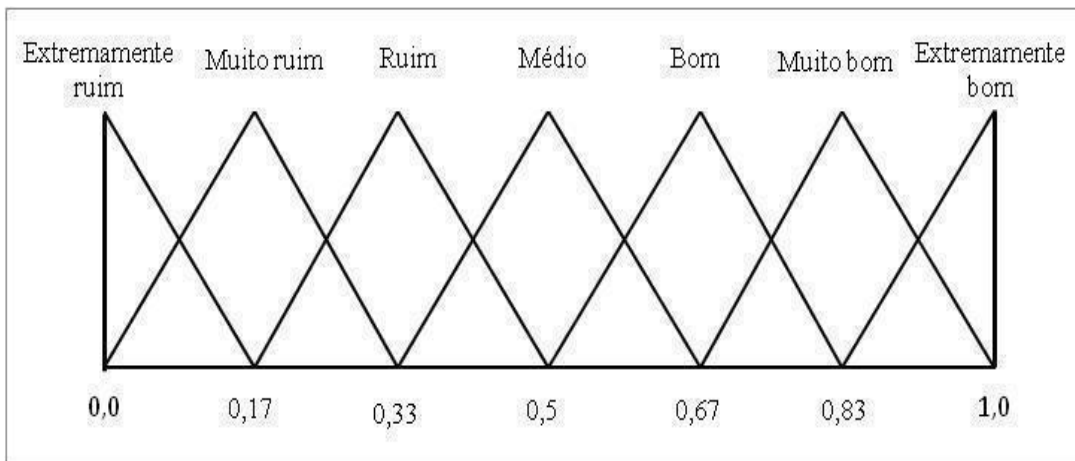
Senvar, Otay e Bolturk (2016) assinalam a existência de algumas extensões dos conjuntos *hesitant fuzzy* como o TFHFS (*Triangular Fuzzy Hesitant Fuzzy*

Sets), o DHFS (*Dual Hesitant Fuzzy Sets*), o HFLTS (*Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets*), o IVHFS (*Interval Valued Hesitant Fuzzy Sets*) e o GHFS (*Generalized Hesitant Fuzzy Sets*). Proposto por Rodriguez, Martinez e Herrera (2012), o *Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets* (HFLTS) é uma extensão da teoria dos conjuntos *fuzzy* e consiste na combinação dos princípios de *Hesitant Fuzzy Sets* com os termos linguísticos *fuzzy*. No presente estudo, foi usada a extensão HFLTS para o desenvolvimento do modelo e as definições fundamentais que estruturam a técnica são apresentadas a seguir.

3.3.2.1 Definição 1: *Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets*

Seja S um conjunto de termos linguísticos, sendo $S = \{s_0, \dots, s_g\}$, conforme exemplifica a Figura 3, H_s é um subconjunto ordenado finito dos termos linguísticos consecutivos de S . Um HFLTS vazio e um HFLTS completo para uma variável linguística (ϑ) podem ser definidos da seguinte forma (RODRÍGUEZ; MARTÍNEZ; HERRERA, 2012; BEG; RASHID, 2013):

Figura 3 - Conjunto de sete termos e sua semântica



Fonte: Rodriguez, Martinez e Herrera (2012).

1. HFLTS vazio: $H_s(\vartheta) = \{ \}$
2. HFLTS completo: $H_s(\vartheta) = S$

Beg e Rashid (2013) destacam que qualquer outro HFLTS é formado por pelo menos um termo linguístico em S .

Exemplo 1. Considerando S como o conjunto de termos linguísticos mostrados na Figura 3, $S = \{s_0: \text{Extremamente Ruim (ER)}, s_1: \text{Muito Ruim (MR)}, s_2: \text{Ruim (R)}, s_3: \text{Médio (M)}, s_4: \text{Bom (B)}, s_5: \text{Muito Bom (MB)}, s_6: \text{Extremamente Bom (EB)}\}$, dois exemplos de subconjuntos de S podem ser expressos como: $H_s(\vartheta) = \{s_1: \text{Muito Ruim (MR)}, s_2: \text{Ruim (R)}, s_3: \text{Médio (M)}\}$ ou $H_s(\vartheta) = \{s_3: \text{Médio (M)}, s_4: \text{Bom (B)}, s_5: \text{Muito Bom (MB)}\}$. Vale ressaltar que vários outros subconjuntos poderiam ser definidos a partir de S . Tais subconjuntos são utilizados no método *Hesitant Fuzzy* - TOPSIS para representar os julgamentos de um decisor em relação ao desempenho das alternativas em cada critério (BEG; RASHID, 2013).

3.3.2.2 Definição 2: Limite superior e inferior de um HFLTS

Seja S um conjunto de termos linguísticos, $S = \{s_0, \dots, s_g\}$, e H_s um HFLTS. O limite superior H_{s+} e o limite inferior H_{s-} de H_s são definidos pelas respectivas equações 2 e 3 (RODRÍGUEZ; MARTÍNEZ; HERRERA, 2012).

$$1. H_{s+} = (s_i) = s_j, s_i \in H_s \text{ e } s_i \leq s_j \quad \forall i; \quad (2)$$

$$2. H_{s-} = (s_i) = s_j, s_i \in H_s \text{ e } s_i \geq s_j \quad \forall i. \quad (3)$$

3.3.2.3 Definição 3: Envoltório de um HFLTS

O envoltório de um HFLTS, $env(H_s)$, é um intervalo linguístico cujos limites são obtidos por meio dos termos superior (*max*) e inferior (*min*) do subconjunto. Logo, $env(H_s) = [H_{s-}, H_{s+}]$ (RODRÍGUEZ; MARTÍNEZ; HERRERA, 2012).

Exemplo 2. Seja $S = \{s_0: \text{Extremamente Ruim (ER)}, s_1: \text{Muito Ruim (MR)}, s_2: \text{Ruim (R)}, s_3: \text{Médio (M)}, s_4: \text{Bom (B)}, s_5: \text{Muito Bom (MB)}, s_6: \text{Extremamente Bom (EB)}\}$ um conjunto de termo linguístico, e $H_s = \{s_4: \text{Bom (B)}, s_5: \text{Muito Bom (MB)}, s_6: \text{Extremamente Bom (EB)}\}$ um HFLTS de S , então o envoltório será (BEG; RASHID, 2013):

$$H_{s-} = \min (s_4: \text{Bom}, s_5: \text{Muito Bom}, s_6: \text{Extremamente Bom})$$

$$H_{s-} = s_4: \text{Bom}$$

$$H_{s+} = \max (s_4: \text{Bom}, s_5: \text{Muito Bom}, s_6: \text{Extremamente Bom})$$

$H_{s_+} = s_6$: Extremamente Bom

$env(H_s) = [s_4, s_6] = [s_4$: Bom, s_6 : Extremamente Bom].

3.3.2.4 Definição 4: Transformação de expressões linguísticas em HFLTS

Rodríguez, Martínez e Herrera (2012) propuseram uma função $E_{GH}: ll \rightarrow H_S$ para transformar as expressões linguística em HFLTS (H_S):

- 1) $E_{GH}(s_i) = \{s_i \mid s_i \in S\}$;
- 2) $E_{GH}(\text{no máximo } s_i) = \{s_j \mid s_j \in S \text{ and } s_j \leq s_i\}$;
- 3) $E_{GH}(\text{menor que } s_i) = \{s_j \mid s_j \in S \text{ and } s_j < s_i\}$;
- 4) $E_{GH}(\text{pelo menos } s_i) = \{s_j \mid s_j \in S \text{ and } s_j \geq s_i\}$;
- 5) $E_{GH}(\text{maior que } s_i) = \{s_j \mid s_j \in S \text{ and } s_j > s_i\}$;
- 6) $E_{GH}(\text{entre } s_i \text{ e } s_j) = \{s_k \mid s_k \in S \text{ and } s_i \leq s_k \leq s_j\}$;

3.3.2.5 Definição 5: Distância entre dois intervalos linguísticos

Seja H_S^1 e H_S^2 dois HFLTS, com $env(H_S^1) = [S_p, S_q]$ e $env(H_S^2) = [S_{p'}, S_{q'}]$. Então, a distância entre H_S^1 e H_S^2 é dada pela equação 4 (BEG; RASHID, 2013):

$$d(H_S^1, H_S^2) = |q' - q| + |p' - p| \quad (4)$$

3.3.3 O Método TOPSIS

Hwang e Yoon (1981) propuseram inicialmente o método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) com o princípio básico de que a alternativa escolhida deve ter a menor distância da solução ideal positiva (*Positive Ideal Solution*, PIS) e a maior distância da solução ideal negativa (*Negative Ideal Solution*, NIS). Em sua configuração original, o método pode ser aplicado para resolver eficazmente problemas que envolva tomada de decisão multicritério que utilizem valores numéricos absolutos em formato *crisp* que são manipulados por meio de cálculos embasados na lógica clássica (LIMA JR.; CARPINETTI, 2015). O procedimento para aplicação do método é composto pelas etapas (HWANG; YOON, 1981):

- a) Montar uma matriz de decisão D correspondente ao desempenho das alternativas conforme a equação 5 e um vetor de pesos W de acordo com a equação 6. Na equação 5, A_i denota as alternativas avaliadas, C_j refere-se aos critérios usados, $i = 1, 2 \dots n$ indica o número das alternativas e $j = 1, 2 \dots m$ o número dos critérios de decisão. Na equação 6, W é composto pelos pesos w_j de cada critério C_j de modo a satisfazer $\sum_{j=1}^m w_j = 1$;

$$D = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_m \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1j} & \dots & d_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{i1} & d_{i2} & \dots & d_{ij} & \dots & d_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nj} & \dots & d_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

$$\tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_m] \quad (6)$$

- b) Normalizar e ponderar a matriz de decisão D . Os elementos da matriz normalizada $N=[n_{ij}]$ são definidos de acordo com a equação 7;

$$n_{ij} = \frac{w_j d_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n d_{ij}^2}} \quad (7)$$

- c) Determinar a solução ideal positiva (*Positive Ideal Solution*, PIS, A^+) e a solução ideal negativa (*Negative Ideal Solution*, NIS, A^-) de acordo com as equações 8 e 9;

$$A^+ = \{ | j = 1, 2, \dots, m \} = \{ n_1^+, \dots, n_j^+, \dots, n_m^+ \} \quad (8)$$

$$A^- = \{ | j = 1, 2, \dots, m \} = \{ n_1^-, \dots, n_j^-, \dots, n_m^- \} \quad (9)$$

- d) Calcular as distâncias para cada alternativa avaliada. Usando a equação 10, obter a distância D_i^+ entre os valores de desempenho normalizados e ponderados da matriz N e os valores da solução ideal positiva. Usando agora a equação 11, calcule a distância D_i^- entre as pontuações das alternativas da matriz N e os valores da solução ideal negativa;

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (n_{ij} - n_j^+)^2} \quad (10)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (n_{ij} - n_j^-)^2} \quad (11)$$

- e) Calcular o coeficiente de aproximação (*closeness coefficient, CC_i*) de acordo com a equação 12, o qual corresponde ao desempenho global (ou à pontuação final) da alternativa *i*;

$$CC_i = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)} \quad (12)$$

- f) Ordenar decrescentemente as alternativas segundo os valores do coeficiente de aproximação, definido no intervalo [0,0, 1,0]. As melhores alternativas são aquelas cujos valores estão mais próximos de 1,0, ou seja, da solução ideal positiva.

3.4 O MÉTODO HESITANT FUZZY-TOPSIS

Beg e Rashid (2013) propuseram o método *Hesitant Fuzzy-TOPSIS* (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) para contornar os problemas de decisão em grupo em situações de incerteza e hesitação. O método *Hesitant Fuzzy-TOPSIS* segue o mesmo princípio do método TOPSIS, isto é, prioriza as alternativas de acordo com sua proximidade em relação à solução ideal positiva (PIS) e solução ideal negativa (NIS). Lima Jr. e Carpinetti (2015) asseveram que a PIS é composta pelas melhores pontuações alcançadas em cada critério, já a NIS é composta pelas piores pontuações recebidas em cada critério. Beg e Rashid (2013) detalharam o método *Hesitant Fuzzy-TOPSIS* com os seguintes passos:

- a) Seja $\tilde{X}^l = [H_{Sij}^l]_{m \times n}$ uma matriz de decisão *fuzzy*; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ é o conjunto de especialistas envolvidos no processo decisório; $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ é o conjunto das alternativas consideradas; e $C =$

$\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ é o conjunto dos critérios utilizado para avaliar as alternativas. O desempenho da alternativa A_i em relação ao critério C_j é denotado como x_{ij} . A matriz agregada $X = [x_{ij}]$, com $X_{ij} = [S_{pij}, S_{qij}]$, é calculada agregando as opiniões dos especialistas $(\tilde{X}^1, \tilde{X}^2, \dots, \tilde{X}^k)$, de acordo com as equações 13 e 14;

$$s_{pij} = \min\{\max H_{Sij}^l, \min H_{Sij}^l\} \quad (13)$$

$$s_{qij} = \max\{\max H_{Sij}^l, \min H_{Sij}^l\} \quad (14)$$

- b) Seja Ω_b uma coleção de critérios de benefício (ou seja, quanto maior o desempenho em C_j , maior será a pontuação final) e Ω_c seja uma coleção de critérios de custo (quanto menor o desempenho em C_j , maior será a pontuação final). A PIS do HFLTS é representada como $\tilde{A}^+ = (\tilde{V}_1^+, \tilde{V}_2^+, \dots, \tilde{V}_n^+)$, e a NIS é definida como $\tilde{A}^- = (\tilde{V}_1^-, \tilde{V}_2^-, \dots, \tilde{V}_n^-)$. As equações 15 e 16 orientam a composição das PIS e NIS para critérios de benefício e de custo. Nessas equações, $\tilde{V}_j^+ = [v_{pj}, v_{qj}]$, ($j = 1, 2, \dots, n$) e ($i = 1, 2, \dots, m$);

$$\tilde{A}^+ = \left[\left(\left(\max_{l=1}^k (H_{Sij}^l) \mid j \in \Omega_b, \quad \left(\min_{l=1}^k (H_{Sij}^l) \mid j \in \Omega_c \right) \right), \right. \right. \\ \left. \left. \left(\left(\max_{l=1}^k (H_{Sij}^l) \mid j \in \Omega_b, \quad \left(\min_{l=1}^k (H_{Sij}^l) \mid j \in \Omega_c \right) \right) \right) \right) \quad (15)$$

$$\tilde{A}^- = \left[\left(\left(\min_{l=1}^k (H_{Sij}^l) \mid j \in \Omega_b, \quad \left(\max_{l=1}^k (H_{Sij}^l) \mid j \in \Omega_c \right) \right), \right. \right. \\ \left. \left. \left(\left(\min_{l=1}^k (H_{Sij}^l) \mid j \in \Omega_b, \quad \left(\max_{l=1}^k (H_{Sij}^l) \mid j \in \Omega_c \right) \right) \right) \right) \quad (16)$$

- c) Construir uma matriz de separação ideal positiva (D^+) e uma matriz de separação ideal negativa (D^-), definidas da seguinte forma;

$$D^+ = \begin{pmatrix} d(x_{11}, \tilde{V}_1^+) + d(x_{12}, \tilde{V}_2^+) + \dots + d(x_{1n}, \tilde{V}_n^+) \\ d(x_{21}, \tilde{V}_1^+) + d(x_{22}, \tilde{V}_2^+) + \dots + d(x_{2n}, \tilde{V}_n^+) \\ \vdots \\ d(x_{m1}, \tilde{V}_1^+) + d(x_{m2}, \tilde{V}_2^+) + \dots + d(x_{mn}, \tilde{V}_n^+) \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$D^- = \begin{pmatrix} d(x_{11}, \tilde{V}_1^-) + d(x_{12}, \tilde{V}_2^-) + \dots + d(x_{1n}, \tilde{V}_n^-) \\ d(x_{21}, \tilde{V}_1^-) + d(x_{22}, \tilde{V}_2^-) + \dots + d(x_{2n}, \tilde{V}_n^-) \\ \vdots \\ d(x_{m1}, \tilde{V}_1^-) + d(x_{m2}, \tilde{V}_2^-) + \dots + d(x_{mn}, \tilde{V}_n^-) \end{pmatrix} \quad (18)$$

- d) Calcular a proximidade relativa (*relative closeness*, RC) de cada alternativa para a solução ideal usando a equação 19, na qual $D_i^- = \sum_{j=1}^n d(x_{ij}, \tilde{V}_j^-)$ e $D_i^+ = \sum_{j=1}^n d(x_{ij}, \tilde{V}_j^+)$;

$$RC(A_i) = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (19)$$

- e) Classificar todas as alternativas A_i ($i = 1, 2, \dots, m$) de acordo com o coeficiente de proximidade $RC(A_i)$. Quanto maior o valor de $RC(A_i)$, melhor é o desempenho final da alternativa A_i .

Ainda que o método *Hesitant Fuzzy-TOPSIS* proposto por Beg e Rashid (2013) apresente benefícios como a possibilidade de considerar a opinião de vários decisores, e de utilizar expressões linguísticas ou mais de um termo linguístico para quantificar o desempenho das alternativas, este método originalmente não contempla a possibilidade da atribuição do nível de importância relativa (pesos) para os critérios de decisão. Para contornar essa limitação do método, o presente estudo propõe a adição de uma etapa para avaliação e cálculo dos pesos dos critérios, considerando a opinião de múltiplos decisores, que deve ser executada antes da avaliação das alternativas. Nessa nova etapa, é utilizado o mesmo algoritmo proposto por Beg e Rashid (2013) para a avaliação das alternativas. Entretanto, como o algoritmo processará uma única matriz de decisão para avaliação dos pesos, o procedimento de agregação de matrizes (equações 13 e 14) foi suprimido. Além disso, para determinação dos pesos dos critérios, foram necessários alguns ajustes na modelagem do passo (a). A matriz de decisão nesta etapa recebeu em suas linhas os “critérios” a serem ponderados, enquanto cada coluna representa os julgamentos de um decisor em relação à

importância dos critérios avaliados. Os procedimentos e a notação matemática da etapa de avaliação e cálculo dos pesos dos critérios são descritos a seguir.

Seja $\tilde{X}^l = [H_{Sij}^l]_{m \times n}$ uma matriz de decisão *fuzzy* composta por m linhas e k colunas; $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ é o conjunto de critérios que serão avaliados e posicionados nas linhas da matriz; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ é o conjunto de especialistas envolvidos no processo decisório, posicionados nas colunas. O nível de importância do critério C_j , dado pelo especialista e_l é denotado como x_{jl} . As soluções ideais positivas e negativas são extraídas da matriz \tilde{X} conforme as equações 15 e 16. Os cálculos seguintes para estimar o peso dos critérios seguem o mesmo roteiro mostrado nos passos (c), (d) e (e). Ao final do passo (e), são obtidos os coeficientes de proximidade relativa das alternativas, representado por $CC(C_j)$, os quais devem ser normalizados por meio da equação 20 para satisfazer a condição de que o somatório dos pesos dos critérios seja igual a 1 (HWANG; YOON, 1981).

$$CN(C_j) = \frac{CC(C_j)}{\sum CC(C_j)} \quad C_j = (1, 2, \dots, m) \quad (20)$$

Seguindo a abordagem proposta pelo presente estudo, os valores normalizados (CN_i) dos pesos dos critérios, obtidos nesse passo adicional, devem ser utilizados para ponderar a pontuação de cada alternativa durante o cálculo das distâncias no método *Hesitant Fuzzy-TOPSIS*. Esse procedimento é baseado em Cevik Onar, Oztaysi e Kahraman (2014), que propõem a ponderação de critérios durante o cálculo das distâncias das alternativas. Portanto, as equações 17 e 18, utilizadas originalmente por Beg e Rashid (2013) para o cálculo das distâncias, serão substituídas pelas equações 21 e 22, para permitir a inclusão dos pesos dos critérios no modelo de decisão. Essas equações definem a distância *hesitant Hamming* ponderada. Desse modo, a equação 4 passa a ser substituída pela equação 23.

$$D_i^+ = \sum_{j=1}^n ||h_{ij} - h_j^+|| \quad (21)$$

$$D_i^- = \sum_{j=1}^n ||h_{ij} - h_j^-|| \quad (22)$$

$$\left| |h_{ij} - h_j^-| \right| = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l |h_{1\sigma(j)} - h_{2\sigma(j)}| \quad (23)$$

Nas equações 21 e 22, h_{ij} é a pontuação das alternativas, h_j^+ e h_j^- são elementos das soluções ideais, positiva e negativa, sendo que todos os valores são representados em formato *hesitant fuzzy*. Conforme ilustra a equação 23, o cálculo da distância entre dois conjuntos *hesitant fuzzy* considera cada um dos termos linguísticos $h_{\sigma(j)}$ que compõem tais conjuntos, sendo que l indica o número de elementos presentes no conjunto com maior quantidade de termos. Os resultados da aplicação da abordagem proposta são apresentados no Capítulo 5. Antes de apresentá-los, o Capítulo 4 detalha o modelo de decisão desenvolvido para priorização de riscos em processos.

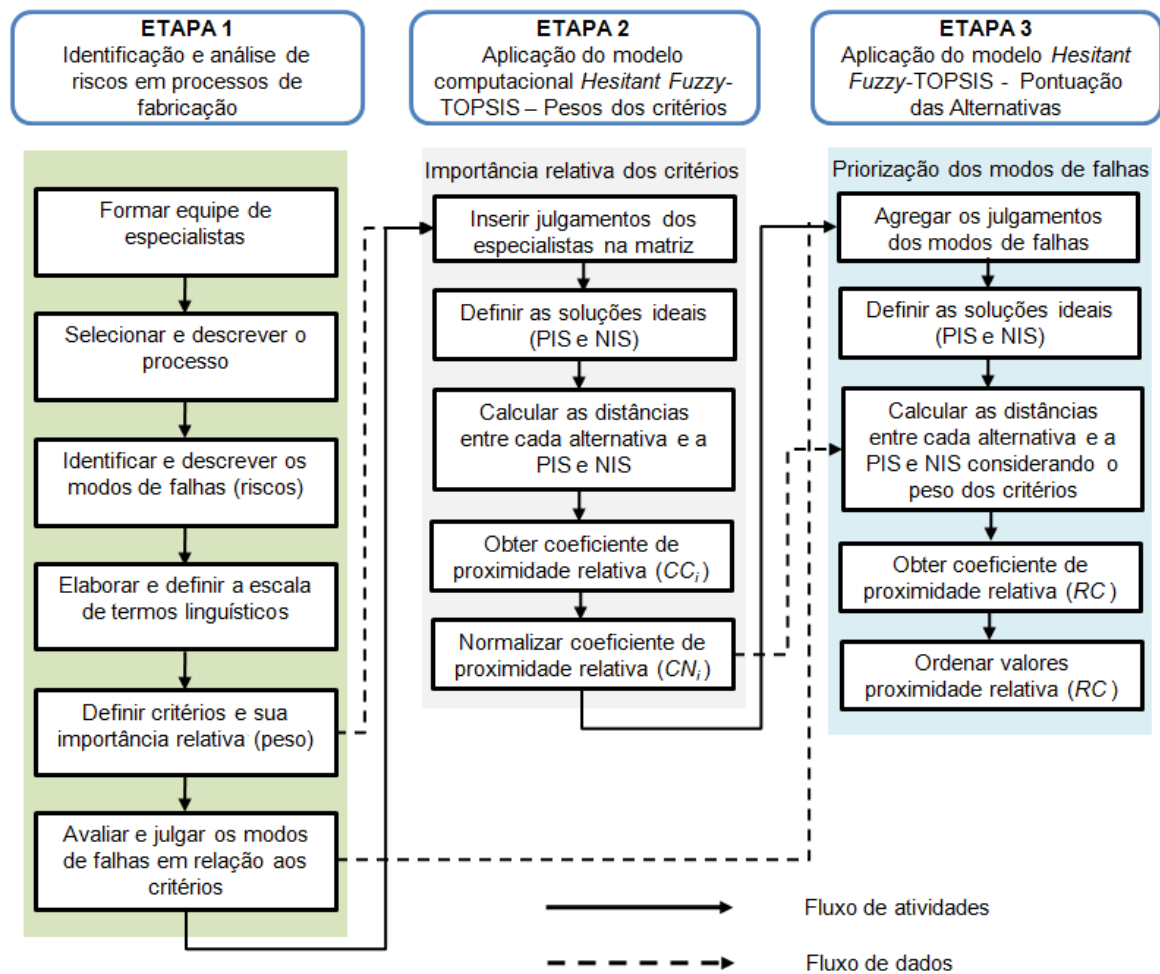
CAPÍTULO 4: PROPOSIÇÃO DO MODELO

O capítulo apresenta o modelo, detalha as etapas e a sequência de passos necessários para sua implementação e foi desenvolvido a partir dos procedimentos dos métodos descritos no capítulo anterior.

4.1 MODELO PARA AVALIAÇÃO E PRIORIZAÇÃO DE RISCOS EM PROCESSOS

A Figura 4 apresenta o modelo que tem por objetivo apoiar a etapa de avaliação e priorização de riscos em processos de fabricação industriais. Este modelo foi desenvolvido a partir da combinação entre o FMEA tradicional, relatado por Liu, Liu e Liu (2013) e Carpinetti (2016), e o método *Hesitant Fuzzy-TOPSIS* proposto por Beg e Rashid (2013). O modelo é composto de três etapas principais; a etapa 1 tem como objetivo identificar e avaliar riscos por uma equipe multifuncional, em um processo de fabricação escolhido para o estudo; a etapa 2 visa a aplicação do modelo computacional para a obtenção dos pesos dos critérios previamente selecionados; e na etapa 3 que encerra o modelo proposto, o objetivo principal é obter a priorização dos modos de falhas (alternativas) em relação aos critérios. As alternativas com valores mais elevados são os riscos do processo sob estudo que requerem tratamentos com maior prioridade. A concepção deste modelo foi baseada no fato de que a combinação do FMEA tradicional com o método *Hesitant fuzzy-TOPSIS* não havia sido proposta na literatura para possibilitar a tomada de decisão em grupo em uma situação de hesitação e incerteza, que é característica da atividade de avaliação de riscos. A seguir os passos de cada etapa do modelo são detalhados para apoiar a aplicação em uma situação real em um processo de fabricação industrial.

Figura 4 - Modelo *Hesitant Fuzzy*-TOPSIS para avaliação e priorização de riscos em processos



Fonte: Elaborado pelo autor.

A etapa 1 se inicia com a formação de uma equipe multidisciplinar composta de especialistas no processo sob estudo e que atuam como tomadores de decisão ou decisores. Dependendo da natureza do processo, dos tipos de riscos envolvidos, a equipe pode envolver profissionais ligados às áreas de engenharia, qualidade, suprimento, produção, segurança do trabalho, entre outras.

A equipe deve selecionar o processo no qual o modelo será aplicado explicitando sua função e as atividades que o compõem, seja por meio da elaboração de um fluxograma ou procedimento escrito. Para cada atividade do processo sob estudo, devem ser identificados e descritos os modos de falhas (riscos) potenciais ou conhecidos. Na condução dessa análise, devem ser considerados a experiência dos membros da equipe, documentação do processo e registros de dados de processos similares.

Na sequência, deve ser elaborada uma escala de termos linguísticos baseada em *hesitant fuzzy linguistic term sets* (HFLTS). Primeiramente, essa escala será utilizada pelos decisores para apoiar o julgamento da importância relativa (peso) dos critérios a serem definidos. Também será usada posteriormente para apoiar o julgamento das alternativas (modos de falhas) em relação a esses critérios. Essa escala é construída de acordo com as preferências dos especialistas, a partir de estudos prévios da literatura sobre métodos de decisão multicritério baseados em lógica *fuzzy*.

Esta etapa segue com a definição dos critérios e a atribuição da importância relativa (peso) para cada um deles. Os critérios selecionados para a aplicação do modelo devem estar relacionados aos fatores capazes de mensurar o impacto dos modos de falhas (riscos) para o cliente final e para a organização como um todo. A atribuição do peso de cada critério deve ficar a cargo de cada um dos decisores que utilizarão a escala de termos linguísticos previamente elaborada. O encerramento da primeira etapa envolve a análise e julgamento dos modos de falhas descritos (alternativas), em relação a cada um dos critérios selecionados. Para a análise e julgamento deve ser utilizada a escala de termos linguísticos desenvolvida anteriormente, que deve levar em conta a experiência dos membros da equipe, o histórico de processos similares e demais informações disponíveis.

A segunda etapa envolve o uso do modelo computacional *Hesitant Fuzzy-TOPSIS* para cálculo e determinação do peso de cada critério selecionado. Os dados referentes ao julgamento da importância relativa de cada critério, fornecidos individualmente pelos decisores, são inseridos no modelo computacional para início do processamento. Para possibilitar o cálculo dos valores dos pesos de cada critério, convertendo-os de um formato HFLTS para números crisp, o procedimento definido por Beg e Rashid (2013) deverá ser aplicado nesta etapa com a seguinte configuração: (a) os critérios selecionados devem ser posicionados nas linhas da matriz (uma vez que estes representam as “alternativas” a serem avaliadas e posteriormente ranqueadas); (b) em cada coluna da matriz devem ser posicionados os julgamentos de cada decisor em relação aos pesos dos critérios avaliados. Os passos seguintes são: a determinação das soluções ideais, positiva e negativa (PIS e NIS), obtidas com a aplicação das respectivas equações 15 e 16; O cálculo da distância da pontuação

de cada alternativa em relação ao valor da PIS e da NIS, executado por meio da equação 4, seguido pela disposição dos resultados conforme as equações 17 e 18; e a aplicação da equação 19 para obtenção dos coeficientes de proximidades relativas (CC_i) das alternativas em relação a PIS e NIS. Para encerrar a segunda etapa, os valores de CC_i devem ser normalizados por meio da equação 20 que resulta os valores representados por CN_i , os quais serão utilizados na etapa 3 do modelo.

Na terceira etapa, os dados referentes aos julgamentos dos modos de falhas em relação aos critérios fornecidos pelos decisores são inseridos no modelo computacional para processamento. Os modos de falhas devem ser posicionados nas linhas da matriz como o conjunto das alternativas consideradas. Nas colunas da matriz devem ser posicionados os critérios selecionados utilizados para avaliar as alternativas. De acordo com o procedimento de Beg e Rashid (2013), tem-se a agregação das pontuações das alternativas aplicando as equações 13 e 14. As soluções ideais positivas e negativas (PIS e NIS) são obtidas pela aplicação das respectivas equações 15 e 16, cujos resultados são utilizados no passo seguinte para a determinação da distância de cada pontuação da alternativa em relação aos valores de PIS e NIS. No cálculo dessas distâncias devem ser levados em consideração os valores normalizados (CN_i) dos pesos de cada critério, obtidos na segunda etapa do modelo, para ponderar a pontuação das alternativas aplicando as equações 21 e 22.

A terceira etapa é finalizada pela aplicação da equação 19 para se obter a proximidade relativa (RC) de cada alternativa em relação à PIS e à NIS, o que permite a ordenação dos valores obtidos. Tomando-se por base os valores das proximidades relativas (RC) em cada alternativa, os modos de falhas devem ser classificados em ordem decrescente. Nesse *ranking*, os valores com maior pontuação representam os modos de falhas mais indesejáveis e que representam um maior nível de risco para o processo. Essa priorização oferece aos gestores a possibilidade de planejar as disposições necessárias para o gerenciamento dos riscos presentes no processo sob estudo, com o potencial de melhorar o seu desempenho, seja por prevenir possíveis perdas ou por identificar alguma oportunidade.

CAPÍTULO 5: APLICAÇÃO PILOTO

Neste capítulo, são apresentados os resultados da aplicação do modelo em um processo de fabricação industrial em uma empresa nacional, com o objetivo de verificar a eficácia do modelo em uma situação real de avaliação e priorização de riscos.

5.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA PARTICIPANTE

A empresa participante desta pesquisa é uma das principais montadoras de chicotes elétricos do Brasil e líder no fornecimento para o segmento de máquinas agrícolas. Desde a sua fundação em 1987, a empresa investe continuamente em infraestrutura e tecnologia, tendo seu sistema de gestão da qualidade certificado de acordo com a NBR ISO 9001. Em atendimento a premissa deste estudo, a empresa utiliza o método FMEA tradicional como um requisito de seu sistema de gestão da qualidade no desenvolvimento de novos produtos e na avaliação de riscos em seus processos de fabricação.

Após o primeiro contato, no qual foi feito o convite e manifestado o interesse da empresa em colaborar com esta pesquisa, realizou-se uma apresentação para toda a diretoria para conhecimento de todos, dos objetivos, do cronograma para o desenvolvimento das etapas e das contribuições do estudo. A aplicação seguiu com a elaboração e disponibilização de um roteiro mostrado no **APÊNDICE A**, que trouxe os elementos iniciais para direcionar as atividades, o qual foi ratificado pelo gestor responsável. A partir da aprovação do roteiro e das definições iniciais, foram marcadas as reuniões para o julgamento da importância relativa (pesos) dos critérios, para o julgamento das alternativas (modos de falhas), para divulgação e análise dos resultados. Este trabalho de campo não teve o objetivo de implementar o modelo proposto na empresa participante, e sim o de aplicar e testar o modelo em uma situação real onde já se aplica o FMEA tradicional para a avaliação e priorização de riscos em um processo de fabricação industrial.

5.2 PROCEDIMENTO DA APLICAÇÃO DO MODELO

5.2.1 Identificação e análise de riscos em processo (Etapa 1)

Ao gestor responsável foi solicitada a formação de uma equipe multifuncional composta de especialistas envolvidos com o processo de fabricação de chicotes elétricos. Na solicitação, não houve restrição do número de especialistas, ficando a cargo do gestor a definição dessa equipe. Estes especialistas também são denominados tomadores de decisão ou decisores e além do conhecimento do processo de fabricação deveriam possuir experiência prévia na aplicação do FMEA tradicional. O gestor então apresentou uma relação com cinco decisores cujos perfis são mostrados no Quadro 8.

Quadro 8 - Perfil da equipe de decisores

Especialista	Área de atuação	Tempo na empresa	Experiência em FMEA
E1	Técnica Comercial	13 anos	5 anos
E2	Engenharia	6 anos	6 anos
E3	Engenharia	10 anos	6 anos
E4	Produção	18 anos	1 ano
E5	Qualidade	12 anos	12 anos

Fonte: Elaborado pelo autor.

A empresa organizou a fabricação de chicotes elétricos em quatro processos principais, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Visão geral dos processos de fabricação

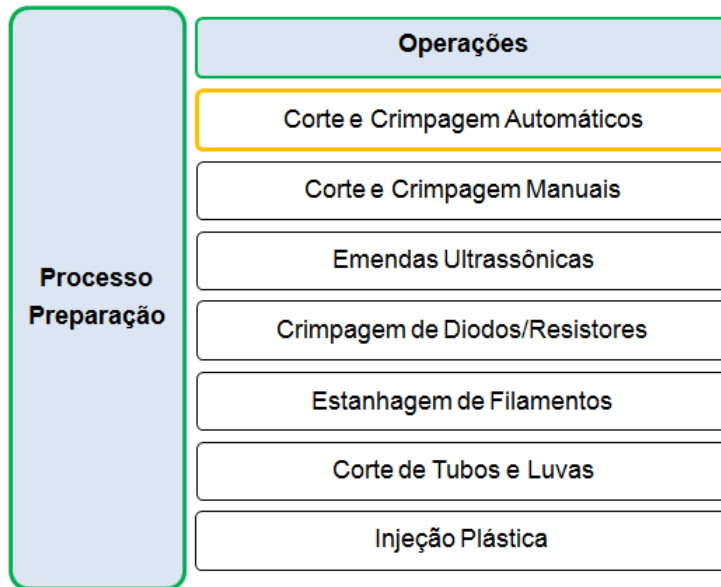


Fonte: Elaborado pelo autor.

O gestor e sua equipe conduziram a escolha do processo de fabricação para a aplicação do modelo. O processo denominado “Preparação” foi selecionado com a justificativa de se tratar de um processo muito crítico da fabricação em razão de, caso ocorra um modo de falha na preparação das partes integrantes do chicote elétrico, este poderá acarretar uma parada parcial ou total das funções

primárias do produto final. O processo de preparação é composto de sete operações principais, mostradas na Figura 6.

Figura 6 - Operações do processo preparação

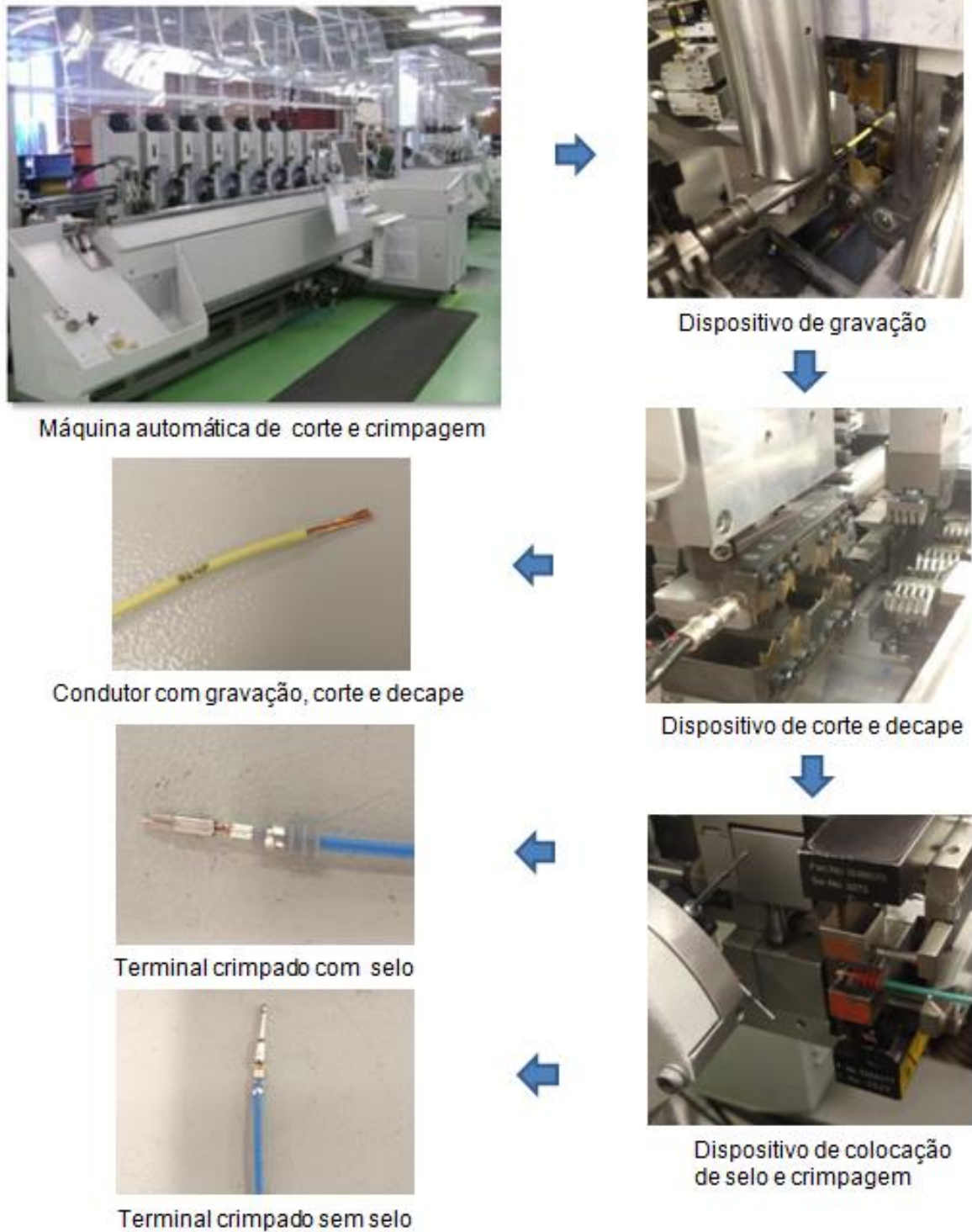


Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido à extensão do processo de preparação, a aplicação do modelo terá como foco os modos de falhas da operação “Corte e Crimpagem Automáticos”. Essa operação é realizada em máquina automática programada para tracionar os condutores elétricos no comprimento requerido. Em toda a extensão desse comprimento, ocorre simultaneamente a impressão de caracteres pré-programados para fins de identificação e rastreabilidade. Ao atingir o comprimento especificado, a máquina executa o corte e em seguida, efetua o decape que consiste em cortar o isolante em uma dimensão pré-ajustada e ao mesmo tempo remover essa parte da extremidade do condutor para expor seus filamentos. Sobre o condutor na região do decape, ocorre a colocação de um selo de borracha, quando requerido, e sobre o filamento ocorre a crimpagem (cravação) do terminal. A crimpagem do terminal é efetuada por meio de um dispositivo de prensa que comprime as garras do terminal contra os filamentos do condutor (decape), contra o selo se requerido e também contra a superfície do isolante remanescente do condutor, promovendo assim a fixação do terminal.

A Figura 7 apresenta a sequência das atividades da operação de corte e crimpagem automáticos descrita acima, e os resultados após cada uma delas.

Figura 7 - Operação corte e crimpagem automáticos e seus resultados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em reunião específica e com base na experiência, na documentação do processo e no histórico de registros da qualidade, os especialistas analisaram, identificaram e descreveram um total de 19 modos de falhas (alternativas) na operação corte e crimpagem automáticos. Os modos de falhas identificados estão listados no Quadro 9.

Quadro 9 - Modos de falhas da operação de corte e crimpagem automáticos

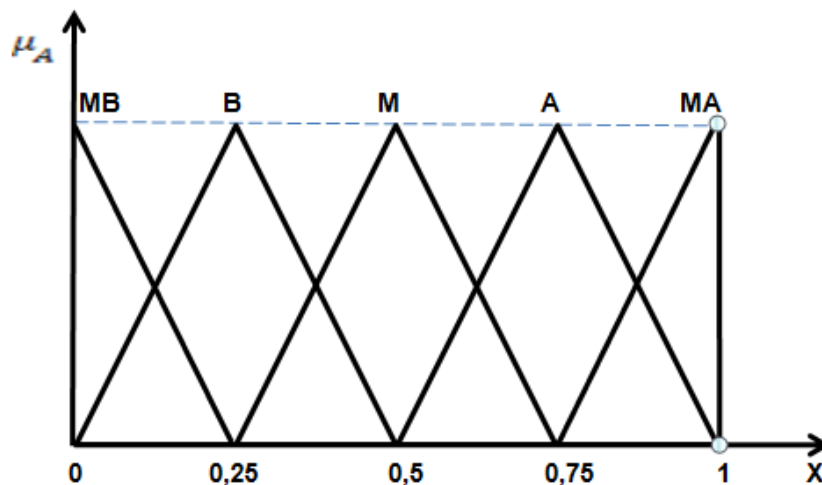
Modo de Falha	Descrição
MF1	Condutor: Comprimento maior que o especificado
MF2	Condutor: Comprimento menor que o especificado
MF3	Decape: Comprimento maior que o especificado
MF4	Decape: Comprimento menor que o especificado
MF5	Gravação: Condutor com caracteres incorretos
MF6	Gravação: Condutor com caracteres na cor incorreta
MF7	Gravação: Condutor com caracteres ilegíveis
MF8	Crimpagem: Resistência à tração menor que especificado
MF9	Crimpagem: Garra do filamento sobre isolante
MF10	Terminal: Curvado (Efeito canoa)
MF11	Terminal: Quebrado
MF12	Terminal: Incorreto
MF13	Selo: Danificado
MF14	Selo: Não aplicado
MF15	Selo: Incorreto
MF16	Terminal: Barril do condutor aberto
MF17	Terminal: Excesso de rebarbas
MF18	Terminal: Boca de sino invertida
MF19	Terminal: Boca de sino ausente

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do conjunto de termos linguísticos definidos na Figura 3, foram elaboradas e apresentadas aos decisores, duas escalas linguísticas. A primeira contendo um conjunto de sete e a segunda com cinco termos linguísticos. As duas escalas foram disponibilizadas e utilizadas pelos decisores para o julgamento da importância relativa (pesos) dos critérios. O objetivo de se utilizar as duas escalas foi definir qual a preferência de uso para que o julgamento ocorresse da forma mais natural possível. Em consenso a equipe optou pelo uso da escala linguística

com um conjunto de cinco termos, ilustrada na Figura 8. A utilização da escala de termos linguísticos foi precedida dos esclarecimentos sobre a possibilidade de atribuir um ou mais termos para cada julgamento das alternativas nas situações onde a incerteza e a hesitação estivessem presentes. As expressões linguísticas foram baseadas em Rodriguez, Martinez e Herrera (2012) e exemplificadas no Quadro 10.

Figura 8 - Escala com cinco termos linguísticos e sua semântica



Onde:

MB – Muito Baixo; B – Baixo; M – Médio; A – Alto; MA – Muito Alto

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Rodriguez, Martinez e Herrera (2012).

Quadro 10 - Expressões linguísticas utilizadas para o julgamento das alternativas

Expressão linguística	Exemplo de uso	Termo(s) Linguístico(s) ativados
Maior que médio	De alto a muito alto	A, MA
Menor que alto	De médio a muito baixo	M, B, MB
Pelo menos alto	De alto a muito alto	A, MA
Entre baixo e alto	De baixo a alto	B, M, A

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Rodriguez, Martinez e Herrera (2012).

A revisão sistemática da literatura realizada neste estudo revelou a escassez de modelos prévios que propõem a utilização de mais de três critérios na determinação do nível de risco. No presente estudo, além dos três critérios tradicionalmente usados no FMEA, foi utilizado o critério denominado “custo” proposto por Banduka *et al.* (2018). Os custos considerados incluem custos internos e externos. Os custos internos incorrem quando a falha acontece antes

de finalizar o processo de fabricação e os produtos defeituosos não chegaram ao cliente. Tipicamente aparecem na forma de retrabalho, refugo, parada de linha e reprogramação da produção. Já os custos externos estão relacionados com as falhas no processo que geram produtos defeituosos que atravessam toda a fabricação e chegam ao cliente final. Tipicamente aparecem na forma de devoluções, garantias de produtos, multas contratuais, perdas de clientes, recalls entre outros custos (BANDUKA *et al.*, 2018).

Adicionalmente ao critério custo, foram utilizados os critérios do FMEA tradicional: “severidade”, que está relacionado com a gravidade do efeito; “ocorrência”, que se relaciona com a frequência que uma falha pode ocorrer; e “detecção”, que avalia os meios de controles existentes (CERTA *et al.*, 2017; CHANG; CHANG; TSAI, 2013; ZHAO, YOU, LIU, 2017). A importância relativa de cada critério (peso) foi avaliada individualmente pelos decisores, apoiados pelo uso da escala e das expressões linguísticas respectivamente Figura 8 e do Quadro 10. Os resultados da avaliação são exibidos em expressões linguísticas no Quadro 11, as quais foram convertidas para o formato HFLTS que são mostrados no Quadro 12.

Quadro 11 - Avaliação dos pesos dos critérios usando expressões linguísticas

Critério	Decisor E1	Decisor E2	Decisor E3	Decisor E4	Decisor E5
Custo	Entre alto e muito alto	Muito alto	Entre médio e alto	Médio	Entre alto e muito alto
Severidade	Muito alto	Médio	Entre médio e alto	Muito alto	Entre médio e alto
Ocorrência	Médio	Alto	Entre baixo e alto	Alto	Entre baixo e médio
Detecção	Alto	Médio	Entre baixo e alto	Baixo	Entre alto e muito alto

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 12 - Conversão da avaliação dos pesos dos critérios para o formato HFLTS

Critério	Decisor E1	Decisor E2	Decisor E3	Decisor E4	Decisor E5
Custo	[A, MA]	[MA]	[M, A]	[M]	[A, MA]
Severidade	[MA]	[M]	[M, A]	[MA]	[M, A]
Ocorrência	[M]	[A]	[B, M, A]	[A]	[B, M]
Detecção	[A]	[M]	[B, M, A]	[B]	[A, MA]

Fonte: Elaborado pelo autor.

A primeira etapa do modelo foi encerrada com o julgamento dos modos de falhas que foram listados no Quadro 9, em relação aos critérios, custo, severidade, ocorrência e detecção. Para execução desse passo, os decisores utilizaram novamente a escala e as expressões linguísticas respectivamente ilustradas na Figura 8 e no Quadro 10. Os julgamentos estão individualizados por decisor e são apresentados nos Quadros 13, 14, 15, 16 e 17, convertidos de expressões linguísticas para o formato HFLTS.

Quadro 13 - Julgamento dos modos de falhas em relação aos critérios (Decisor E1)

Modo de falha	Critérios			
	Custo	Severidade	Ocorrência	Detecção
MF1	[B]	[M]	[B, M]	[A]
MF2	[A, MA]	[A]	[B, M]	[A]
MF3	[M]	[A]	[B, M]	[MA]
MF4	[M]	[MA]	[B, M]	[MA]
MF5	[MB, B]	[M]	[B]	[MB, B]
MF6	[MB, B]	[M]	[B]	[MB, B]
MF7	[MB, B]	[M]	[B]	[MB, B]
MF8	[M]	[MA]	[B, M]	[MA]
MF9	[M]	[MA]	[B, M]	[MA]
MF10	[M]	[MA]	[B, M]	[MA]
MF11	[A]	[A, MA]	[B, M]	[MB, B]
MF12	[A]	[A, MA]	[MB, B]	[MB, B]
MF13	[M]	[A, MA]	[B]	[M]
MF14	[M]	[A, MA]	[B, M]	[MA]
MF15	[A]	[A, MA]	[B, M]	[M]
MF16	[M]	[A, MA]	[B, M]	[A, MA]
MF17	[M]	[A, MA]	[B, M]	[M]
MF18	[M]	[A]	[B, M]	[B, M]

MF19	[M]	[A]	[B, M]	[B, M]
------	-------	-------	----------	----------

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 14 - Julgamento dos modos de falhas em relação aos critérios (Decisor E2)

Modo de Falha	Critérios			
	Custo	Severidade	Ocorrência	Detecção
MF1	[M]	[MB]	[B]	[MB]
MF2	[A, MA]	[MA]	[MA]	[A]
MF3	[MB]	[B, M]	[B]	[MB]
MF4	[MA]	[A]	[MB, B]	[M]
MF5	[A]	[M]	[M]	[B]
MF6	[B]	[M]	[MB]	[M]
MF7	B] [[M]	[MB]	[M]
MF8	[M, A, MA]	[MA]	[M]	[M]
MF9	[MA]	[MA]	[M]	[A]
MF10	[M]	[M, A]	[M]	[M]
MF11	[M, A]	[M]	[B]	[M, A]
MF12	[M, A]	[M]	[B]	[M, A]
MF13	[A, MA]	[A]	[M]	[M, A]
MF14	[A, MA]	[A]	[M]	[M, A]
MF15	[A, MA]	[A]	[M]	[M, A]
MF16	[A, MA]	[A, MA]	[M]	[M, A]
MF17	[MA]	[MA]	[M]	[M]
MF18	[MA]	[MA]	[M]	[M]
MF19	[A, MA]	[MA]	[M]	[A]

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 15 - Julgamento dos modos de falhas em relação aos critérios (Decisor E3)

Modo de Falha	Critérios			
	Custo	Severidade	Ocorrência	Detecção
MF1	[B]	[B]	[MB]	[M]
MF2	[M, A]	[M]	[MB]	[M, A]
MF3	[MB]	[B]	[A]	[M]
MF4	[M, A]	[A, MA]	[A]	[B]
MF5	[MB]	[MB]	[M]	[M]
MF6	[MB]	[B]	[B]	[A]
MF7	[M]	[B]	[M]	[B]
MF8	[A]	[M, A]	[M]	[A]

MF9	[M, A]	[M, A]	[B]	[A]
MF10	[M]	[A]	[B]	[B]
MF11	[M]	[A]	[B]	[B]
MF12	[M, A]	[A]	[M]	[A]
MF13	[M, A]	[A]	[MB]	[M]
MF14	[M, A]	[A]	[MB]	[A]
MF15	[M, A]	[A]	[MB]	[A]
MF16	[M, A]	[A]	[B, M]	[A]
MF17	[M, A]	[A]	[B]	[M]
MF18	[M, A]	[A]	[B]	[M]
MF19	[M, A]	[A]	[B]	[B]

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 16 - Julgamento dos modos de falhas em relação aos critérios (Decisor E4)

Modo de Falha	Critérios			
	Custo	Severidade	Ocorrência	Detecção
MF1	[A]	[A, MA]	[B]	[M, A]
MF2	[A, MA]	[A, MA]	[B]	[MA]
MF3	[A, MA]	[MA]	[B]	[MA]
MF4	[A]	[MA]	[MB]	[MA]
MF5	[B, M]	[M]	[MB]	[MA]
MF6	[B, M]	[M, A]	[M, A]	[B, M]
MF7	[B, M]	[M, A]	[B]	[M]
MF8	[A, MA]	[A, MA]	[B, M]	[A, MA]
MF9	[A, MA]	[A, MA]	[MB, B]	[B, M]
MF10	[A]	[MA]	[B]	[M, A]
MF11	[MA]	[M]	[MB]	[MA]
MF12	[MA]	[M, A]	[MB]	[A, MA]
MF13	[M, A]	[M, A]	[MB]	[MA]
MF14	[M, A]	[M, A]	[MB]	[M, A]
MF15	[B, M]	[B, M]	[B, M]	[M, A]
MF16	[B, M]	[M, A]	[MB, B]	[A, MA]
MF17	[A, MA]	[M, A]	[MB]	[A, MA]
MF18	[M, A]	[M, A]	[MB]	[A]
MF19	[B, M]	[B, M]	[B]	[A]

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 17 - Julgamento dos modos de falhas em relação aos critérios (Decisor E5)

Modo de Falha	Critérios			
	Custo	Severidade	Ocorrência	Detecção
MF1	[MB]	[MB]	[B]	[MB]
MF2	[A]	[M]	[B, M]	[MA]
MF3	[MB]	[B, M]	[B]	[B]
MF4	[M, A]	[A]	[MB, B]	[M, A]
MF5	[MB, B]	[MB, B]	[B, M]	[B, M]
MF6	[MB, B]	[MB, B]	[M]	[B]
MF7	[MB, B]	[MB, B]	[B, M]	[B, M]
MF8	[M, A]	[M, A]	[B]	[M, A]
MF9	[A]	[A]	[MB, B]	[M, A]
MF10	[MB]	[B]	[B, M]	[B, M]
MF11	[M]	[M]	[MB]	[MA]
MF12	[M]	[A]	[B]	[A]
MF13	[B]	[M, A]	[B]	[B, M]
MF14	[B]	[M, A]	[B]	[M, A]
MF15	[B]	[M, A]	[B]	[MB, B]
MF16	[B, M]	[M, A]	[B]	[B, M]
MF17	[M]	[M, A]	[B]	[B, M]
MF18	[B]	[B]	[M, A]	[B, M]
MF19	[B]	[B]	[M, A]	[B, M]

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2 Aplicação do modelo para determinação dos pesos dos critérios (Etapa 2)

A etapa se inicia com a inserção dos valores obtidos na avaliação da importância relativa dos critérios, listados no Quadro 12, nos campos do modelo computacional desenvolvido no software *Microsoft Excel*[®]. Nessa etapa, foram suprimidas as equações 13 e 14. Dessa forma, a operação de agregação dos julgamentos dos decisores não foi aplicada, já que os julgamentos de todos os decisores compõem uma única matriz, sendo uma coluna reservada para cada decisor. Os valores dos julgamentos individuais dos decisores representados na forma de envoltórios de HFLTS são apresentados na Tabela 2. Nessa tabela, os valores representados por s_p e s_q onde: “ p ” é o limite inferior do envoltório e “ q ” é o limite superior do envoltório, os quais podem variar de 1 a 5 de acordo com o número de termos da escala linguística proposta no presente estudo.

Tabela 2 - Julgamentos da importância dos critérios no formato de envoltório HFLTS

Critério	Decisores									
	E1		E2		E3		E4		E5	
	S _p	S _q	S _p	S _q	S _p	S _q	S _p	S _q	S _p	S _q
Custo	4	5	5	5	3	4	3	3	4	5
Severidade	5	5	3	3	3	4	5	5	3	4
Ocorrência	3	3	4	4	2	4	4	4	2	3
Detecção	4	4	3	3	2	4	2	2	4	5

Fonte: Elaborada pelo autor.

A solução ideal positiva (PIS) foi obtida pela aplicação da equação 15, que retornou o resultado $\tilde{A}^+ = [[5, 5] [5, 5] [3, 4] [5, 5] [4, 5]]$. A solução ideal negativa (NIS) foi definida pela equação 16 com o resultado, $\tilde{A}^- = [[3, 3] [3, 3] [2, 4] [2, 2] [2, 3]]$, considerando-se que a variável avaliada (peso) foi modelada como um critério de benefício, uma vez que quanto maior a pontuação alcançada, maior será sua importância relativa e melhor a sua classificação no *ranking*. A distância entre cada valor agregado das alternativas, mostrados na tabela 2, em relação a cada valor da PIS e da NIS foi obtida por meio da aplicação da equação 4. Esse cálculo resultou na matriz de separação ideal positiva (D^+) ilustrada na Tabela 3 e na matriz de separação ideal negativa (D^-) mostrada na Tabela 4, respectivamente.

Tabela 3 - Matriz de separação ideal positiva

Matriz D+	Decisores										
	E1		E2		E3		E4		E5		Soma
Custo	0	1	0	0	0	0	2	2	0	0	5
Severidade	0	0	2	2	0	0	0	0	1	1	6
Ocorrência	2	2	1	1	0	1	1	1	2	2	13
Detecção	1	1	2	2	0	1	3	3	0	0	13

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4 - Matriz de separação ideal negativa

Matriz D-	Decisores										
	E1		E2		E3		E4		E5		Soma
Custo	2	1	2	2	0	1	1	1	2	2	14
Severidade	2	2	0	0	0	1	3	3	1	1	13
Ocorrência	0	0	1	1	0	0	2	2	0	0	6
Detecção	1	1	0	0	0	0	0	0	2	2	6

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os coeficientes das proximidades relativas (*Closeness Coefficient*, CC_i) foram calculados pela equação 19 e são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Pesos dos critérios com base nos valores de CC_i

Critério	CC_i
Custo	0,737
Severidade	0,684
Ocorrência	0,316
Detecção	0,316

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com os julgamentos dos decisores, o critério denominado “custo”, que está relacionado com as perdas internas e externas à organização provocadas pelo modo de falha, foi considerado como o de maior importância relativa (peso), seguido pelo critério “severidade”, que está relacionado com a gravidade do efeito do modo de falha. Já o critério “ocorrência”, que se relaciona com a frequência que um modo de falha pode acontecer, e o critério “detecção”, que avalia os controles existentes, foram considerados de mesma importância relativa. Os resultados de CC_i para os pesos dos critérios mostrados na Tabela 5, foram então normalizados por meio da equação 20 para garantir que o somatório dos pesos dos critérios fosse igual a 1. Os valores normalizados (CN_i) serão usados mais adiante, na etapa 3 do modelo, e são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Pesos dos critérios com base no CC_i normalizado

Critério	CN_i
Custo	0,359
Severidade	0,333
Ocorrência	0,154
Detecção	0,154

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.3 Aplicação do modelo para avaliação dos modos de falha (Etapa 3)

Primeiramente os valores dos julgamentos dos modos de falhas em relação aos critérios mostrados nos Quadros 13, 14, 15, 16 e 17, foram inseridos nos campos do modelo computacional. Esses valores dos julgamentos foram agregados aplicando as equações 13 e 14, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores agregados das avaliações dos modos de falhas

Modo de Falha	Critérios							
	Custo		Severidade		Ocorrência		Detecção	
	S _p	S _q	S _p	S _q	S _p	S _q	S _p	S _q
MF1	1	4	1	4	1	2	1	4
MF2	4	4	1	5	1	5	4	5
MF3	1	4	2	5	2	4	1	5
MF4	3	5	4	5	1	4	2	5
MF5	1	4	1	3	1	3	2	5
MF6	1	2	2	3	1	3	2	4
MF7	2	3	2	3	1	3	2	3
MF8	3	4	4	5	2	3	3	5
MF9	3	5	4	5	2	3	3	5
MF10	1	4	2	5	2	3	2	5
MF11	3	5	3	4	1	2	2	5
MF12	3	5	3	4	1	3	2	4
MF13	2	4	4	4	1	3	3	5
MF14	2	4	4	4	1	3	4	5
MF15	2	4	3	4	1	3	2	4
MF16	3	4	4	4	2	3	3	4
MF17	3	5	4	5	1	3	3	4
MF18	2	5	2	5	1	3	3	4
MF19	2	4	2	5	2	3	2	4

Fonte: Elaborada pelo autor.

No passo seguinte foi definida a solução ideal positiva (PIS) aplicando a equação 15 que retornou o resultado $\tilde{A}^+ = [[5, 5] [5, 5] [5, 5] [1, 1]$. Os critérios “custo”, “severidade” e “ocorrência” representam uma coleção de critérios de benefício, uma vez que quanto maior a pontuação de uma falha nesses critérios, melhor será sua classificação no *ranking*. Já o critério “detecção” foi modelado

como um critério de custo, isto é, quanto maior a pontuação de uma falha neste critério, pior será sua classificação no *ranking*. A solução ideal negativa (NIS) foi definida pela equação 16 como $\tilde{A}^- = [[1, 1] [1, 1] [1, 1] [5, 5]]$. Na definição da PIS e da NIS, devem ser considerados os valores dos julgamentos individuais mostrados nos Quadros 13, 14, 15, 16 e 17.

O procedimento da etapa 3 segue com o cálculo das distâncias entre os valores agregados dos julgamentos dos decisores mostrados na Tabela 7, em relação aos valores da PIS e da NIS. Nesse passo, para permitir o uso dos pesos de cada critério mostrados na Tabela 6, os valores normalizados (CN_i) devem ser aplicados no cálculo das distâncias por meio das respectivas equações 21 e 22 para ponderar as pontuações das alternativas. Os resultados dos cálculos das distâncias D^+ representam as distâncias das alternativas em relação a PIS e são mostradas na Tabela 8, enquanto que os resultados dos cálculos das distâncias D^- representam as distâncias das alternativas em relação a NIS são mostradas na Tabela 9.

Tabela 8 - Distâncias dos valores das alternativas em relação a PIS

Modo de Falha	Critérios				Soma
	Custo	Severidade	Ocorrência	Deteccção	D ⁺
MF1	0,897	0,833	0,538	0,231	2,500
MF2	0,359	0,333	0,308	0,538	1,538
MF3	0,897	0,500	0,308	0,308	2,013
MF4	0,359	0,167	0,385	0,385	1,295
MF5	0,897	1,000	0,462	0,385	2,744
MF6	1,256	0,833	0,462	0,308	2,859
MF7	0,897	0,833	0,462	0,231	2,423
MF8	0,538	0,167	0,385	0,462	1,551
MF9	0,359	0,167	0,385	0,462	1,372
MF10	0,897	0,500	0,385	0,385	2,167
MF11	0,359	0,500	0,538	0,385	1,782
MF12	0,359	0,500	0,462	0,308	1,628
MF13	0,718	0,333	0,462	0,462	1,974
MF14	0,718	0,333	0,462	0,538	2,051
MF15	0,718	0,500	0,462	0,308	1,987
MF16	0,538	0,333	0,385	0,385	1,641
MF17	0,359	0,167	0,462	0,385	1,372
MF18	0,538	0,500	0,462	0,385	1,885

MF19	0,718	0,500	0,385	0,308	1,910
------	-------	-------	-------	-------	-------

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 9 - Distâncias dos valores das alternativas em relação a NIS

Modo de Falha	Critérios				Soma D [*]
	Custo	Severidade	Ocorrência	Detecção	
MF1	0,538	0,500	0,077	0,385	1,500
MF2	1,077	1,000	0,308	0,077	2,462
MF3	0,538	0,833	0,308	0,308	1,987
MF4	1,077	1,167	0,231	0,231	2,705
MF5	0,538	0,333	0,154	0,231	1,256
MF6	0,179	0,500	0,154	0,308	1,141
MF7	0,538	0,500	0,154	0,385	1,577
MF8	0,897	1,167	0,231	0,154	2,449
MF9	1,077	1,167	0,231	0,154	2,628
MF10	0,538	0,833	0,231	0,231	1,833
MF11	1,077	0,833	0,077	0,231	2,218
MF12	1,077	0,833	0,154	0,308	2,372
MF13	0,718	1,000	0,154	0,154	2,026
MF14	0,718	1,000	0,154	0,077	1,949
MF15	0,718	0,833	0,154	0,308	2,013
MF16	0,897	1,000	0,231	0,231	2,359
MF17	1,077	1,167	0,154	0,231	2,628
MF18	0,897	0,833	0,154	0,231	2,115
MF19	0,718	0,833	0,231	0,308	2,090

Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma vez conhecidas as distâncias das alternativas em relação a PIS e NIS, foram calculadas as proximidades relativas (*RC*) aplicando-se a equação 19, cujos resultados são mostrados no Quadro 18. Quanto maior o valor de *RC*, melhor é o desempenho final da alternativa. No presente estudo, o maior valor de *RC* indica que a respectiva alternativa, ou seja, o modo de falha se apresenta como prioritário para receber as ações necessárias, por representar o mais elevado grau de risco para o processo sob análise. Seguindo esse raciocínio, as posições dos modos de falhas no *ranking* oferecem ao gestor a possibilidade de se estabelecer um plano de ação para avaliar o grau de risco, os recursos disponíveis e com qual prioridade estes riscos devem ser tratados.

Quadro 18 - Resultados do cálculo de RC e ordenação dos modos de falhas

Ranking	RC	MF	Descrição do modo de falha (Alternativa)
1º	0,676	MF4	Decape: Comprimento menor que o especificado
2º	0,657	MF9	Terminal: Excesso de rebarbas
2º	0,657	MF17	Crimpagem: Garra do filamento sobre isolante
3º	0,615	MF2	Crimpagem: Resistência à tração menor que o especificado
4º	0,612	MF8	Condutor: Comprimento menor que o especificado
5º	0,593	MF12	Terminal: Barril do condutor aberto
6º	0,590	MF16	Terminal: Incorreto
7º	0,554	MF11	Terminal: Quebrado
8º	0,529	MF18	Terminal: Boca de sino ausente
9º	0,522	MF19	Terminal: Boca de sino invertida
10º	0,506	MF13	Selo: Danificado
11º	0,503	MF15	Selo: Incorreto
12º	0,497	MF3	Decape: Comprimento maior que o especificado
13º	0,487	MF14	Selo: Não aplicado
14º	0,458	MF10	Terminal: Curvado (Efeito canoa)
15º	0,394	MF7	Gravação: Condutor com caracteres ilegíveis
16º	0,375	MF1	Condutor: Comprimento maior que o especificado
17º	0,314	MF5	Gravação: Condutor com caracteres incorretos
18º	0,285	MF6	Gravação: Condutor com caracteres na cor incorreta

Fonte: Elaborado pelo autor.

No processo de fabricação em análise, os resultados apontaram MF4 “Decape: Comprimento menor que o especificado” como sendo o modo de falha que apresentou o nível de risco mais elevado. Segundo os especialistas, caso ocorra esse modo de falha no processo de fabricação, poderá trazer como consequência a interrupção parcial ou total das funções primárias do chicote elétrico. O circuito com o comprimento do decape menor que o especificado não permite a crimpagem (cravação) do terminal na posição correta nos filamentos expostos e desta forma permanece fixado ao isolante do condutor. Essa crimpagem do terminal na posição incorreta pode interromper parcialmente ou totalmente a passagem da corrente elétrica do circuito, fato que pode afetar o correto funcionamento do produto final. Em relação ao MF6 “Gravação: Condutor com caracteres na cor incorreta”, que aparece nos resultados da aplicação piloto como o modo de falha com o menor nível de risco para o processo, de acordo com os especialistas, caso ocorra esse modo de falha, as funções primárias do chicote

elétrico não serão afetadas e não prejudicarão o correto funcionamento do produto final. Esse modo de falha está relacionado com o descumprimento das especificações, portanto, uma não conformidade quanto aos requisitos do projeto do chicote elétrico.

Ao comparar os resultados do FMEA tradicional executado pela empresa anteriormente ao presente estudo, pode-se observar no Quadro 19 as diferenças no nível de risco dos modos de falhas analisados e na priorização destes por ambas as abordagens.

Quadro 19 – Comparativo de resultados entre o modelo proposto e o FMEA tradicional

Hesitant Fuzzy - TOPSIS			FMEA Tradicional	
Ranking	RC	MF	Ranking	MF
1º	0,676	MF4	1º	MF4
2º	0,657	MF9	1º	MF12
2º	0,657	MF17	1º	MF16
3º	0,615	MF2	1º	MF17
4º	0,612	MF8	1º	MF18
5º	0,593	MF12	1º	MF19
6º	0,590	MF16	2º	MF2
7º	0,554	MF11	2º	MF11
8º	0,529	MF18	3º	MF8
9º	0,522	MF19	4º	MF3
10º	0,506	MF13	4º	MF10
11º	0,503	MF15	4º	MF13
12º	0,497	MF3	4º	MF14
13º	0,487	MF14	4º	MF15
14º	0,458	MF10	5º	MF1
15º	0,394	MF7	6º	MF9
16º	0,375	MF1	7º	MF5
17º	0,314	MF5	8º	MF6
18º	0,285	MF6	ND	MF7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em ambas as abordagens, o modo de falha MF4 “Decape: Comprimento menor que o especificado” apresenta o mais elevado nível de risco para o processo de fabricação. Ocorre que no FMEA tradicional, o MF4 recebe o mesmo nível de risco de outros cinco modos de falhas: MF12, MF16, MF17, MF18 e

MF19. Isso ocorre devido a um dos problemas da etapa de avaliação de riscos do FMEA tradicional citados no Quadro 6 deste estudo. Ou seja, diferentes conjuntos de pontuações para os critérios “ocorrência”, “severidade e “detecção” podem produzir o mesmo valor de RPN, mas as implicações de risco ocultas podem ser totalmente diferentes. Tal assertiva é confirmada quando se observa que o modo de falha MF19 “Terminal: Boca de sino ausente” no método tradicional recebe a prioridade máxima, enquanto que no método *Hesitant Fuzzy – TOPSIS*, o modo de falha MF19 é classificado na nona posição do ranking de acordo com o julgamento dos mesmos especialistas.

Dentre os modos de falhas que ocupam as últimas prioridades no método tradicional, tem-se a MF9 “Terminal: Excesso de rebarbas” que no modelo proposto ocupa a segunda posição em prioridade, o que denota uma significativa discrepância de resultados. Tal variação pode ser atribuída ao efeito de um ou mais problemas da etapa de avaliação de risco do FMEA relatados no Quadro 6: (a) dificuldade de as pontuações de um modo de falha nos três critérios “O”, “S” e “D” serem precisamente avaliados com o uso de valores numéricos determinísticos, que não permitem quantificar medidas incertas ou imprecisas; (b) pequena variação em um dos critérios altera drasticamente o valor de RPN. Para o primeiro problema, o modelo proposto apresenta a possibilidade do uso de expressões linguísticas que permitem a tomada de decisão mesmo em situação de incerteza e hesitação. Por ser um método compensatório o *Hesitant Fuzzy - TOPSIS* corrige a variação brusca provocada por uma pontuação discrepante.

Na comparação entre as abordagens, pode ser observada, diferença quanto ao número de discriminações. No modelo proposto foram obtidos 18 níveis de risco para os 19 modos de falhas identificados no processo de fabricação, enquanto que oito níveis de risco foram obtidos no FMEA tradicional. Quanto maior a discriminação no número dos níveis de risco, melhor a capacidade de priorização na etapa de avaliação de risco, uma vez que os gestores devem propor um plano de ação que leva em consideração a priorização de cada modo de falha, os recursos disponíveis e os riscos envolvidos.

CAPÍTULO 6: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO

Este capítulo descreve o procedimento adotado para testar o efeito da alteração dos parâmetros de entrada nos valores de saída do modelo proposto, bem como os resultados obtidos a partir de tais testes. O presente estudo propôs um modelo com uma modificação no procedimento original de Beg e Rashid (2013) com o objetivo de expandir a capacidade do método *Hesitant Fuzzy-TOPSIS* no apoio à decisão em grupo, de tal forma que a importância relativa de cada critério possa ser atribuída por múltiplos decisores. Os pesos dos critérios foram utilizados nos cálculos para ponderar o julgamento das alternativas e assim determinar a priorização destas. Com o objetivo de avaliar os efeitos da variação dos dados de entrada relativos aos pesos dos critérios nos valores de *RC* usados para a priorização das alternativas (modos de falhas) e de verificar a consistência dos resultados obtidos na aplicação piloto do modelo, foi executada uma análise de sensibilidade.

Para Saltelli (2019), a análise de sensibilidade é um método que permite que se determine como os resultados finais de um modelo podem ser atribuídos a diferentes variações nos dados de entrada deste modelo. A análise de sensibilidade neste estudo foi conduzida com a criação de quatro cenários distintos, nos quais houve a variação controlada dos dados de entrada relativos aos pesos dos critérios na etapa 2 do modelo, enquanto que as pontuações obtidas por meio do julgamento dos decisores para as alternativas (modo de falhas), ilustradas nos Quadros 13, 14, 15, 16 e 17 se mantiveram inalteradas para cada cenário. O Quadro 20 apresenta em formato HFLTS os valores dos pesos dos critérios em cada cenário.

Quadro 20 - Pesos atribuídos aos critérios em cada cenário

Cenário	Critérios			
	Custo	Severidade	Ocorrência	Detecção
1	MA	M	M	M
2	M	MA	M	M
3	M	M	MA	M
4	M	M	M	MA

Fonte: Elaborado pelo autor.

O termo linguístico que expressa o valor máximo da importância relativa (peso), de acordo com a Figura 8 é o “muito alto” (MA). O termo MA foi atribuído de maneira alternada a cada um dos critérios, enquanto que para os demais eram atribuídos o termo “médio” (M) para cada um dos cenários. Atribuir o termo “médio” significa utilizar a mediana da escala linguística para neutralizar três dos quatro critérios, enquanto que o critério em evidência recebe o valor máximo da escala. Os resultados das proximidades relativas (*RC*) das alternativas (modos de falhas) obtidos na análise de sensibilidade do modelo em face às alterações dos dados de entradas (peso) são mostrados na Tabela 10, que permite a comparação dos resultados de cada cenário com os resultados da aplicação piloto.

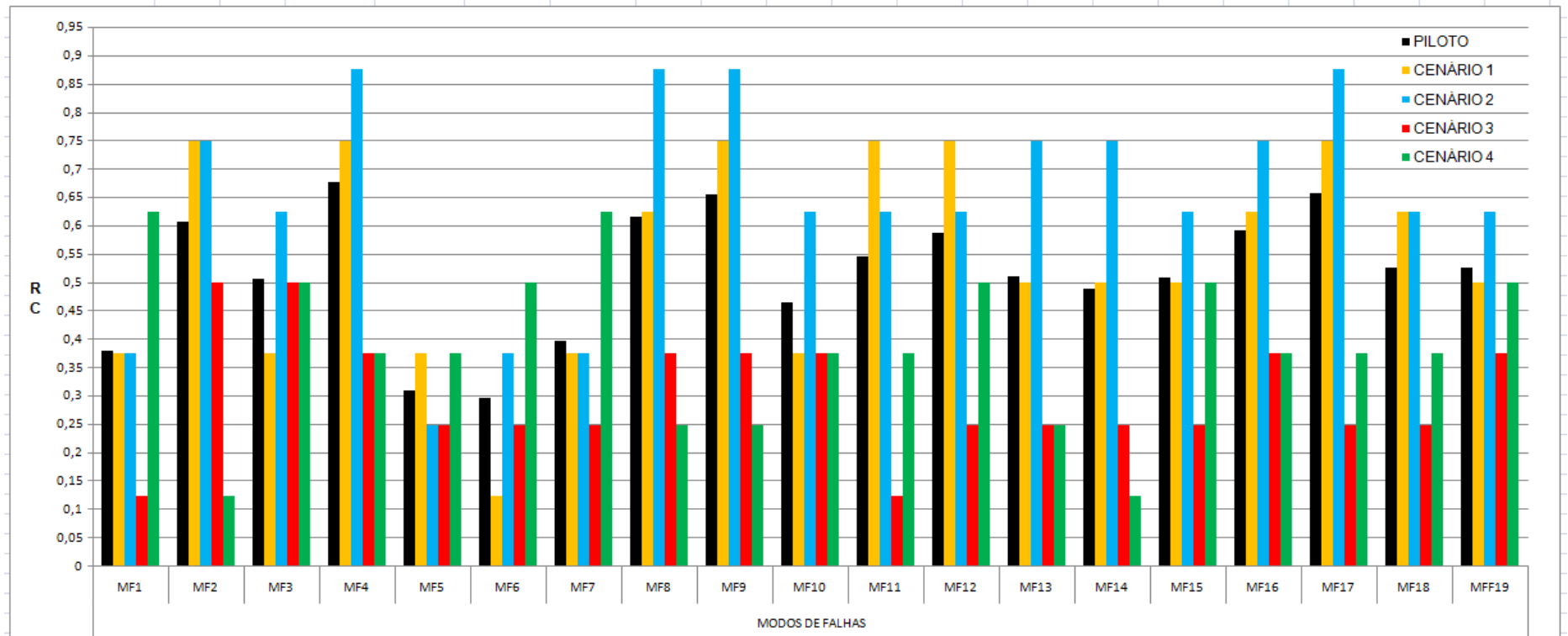
A Figura 9 ilustra a variação dos valores de proximidade relativa (*RC*) para cada modo de falha em função da alteração controlada do peso dos critérios em cada um dos cenários propostos. Esse recurso permite a comparação dos resultados entre a aplicação piloto e os cenários em relação ao comportamento de cada um dos modos de falhas em função da variação da importância relativa (peso) dos critérios.

Tabela 10 - Resultados da análise de sensibilidade nos cenários propostos

Aplicação Piloto			Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3			Cenário 4		
Ranking	RC _i	MF	Ranking	RC _i	MF	Ranking	RC _i	MF	Ranking	RC _i	MF	Ranking	RC _i	MF
1º	0,676	MF4	1º	0,750	MF2	1º	0,875	MF4	1º	0,500	MF2	1º	0,625	MF1
2º	0,657	MF9	1º	0,750	MF4	1º	0,875	MF8	1º	0,500	MF3	1º	0,625	MF7
2º	0,657	MF17	1º	0,750	MF9	1º	0,875	MF9	2º	0,375	MF4	2º	0,500	MF3
3º	0,615	MF2	1º	0,750	MF11	1º	0,875	MF17	2º	0,375	MF8	2º	0,500	MF6
4º	0,612	MF8	1º	0,750	MF12	2º	0,750	MF2	2º	0,375	MF9	2º	0,500	MF12
5º	0,593	MF12	1º	0,750	MF17	2º	0,750	MF13	2º	0,375	MF10	2º	0,500	MF15
6º	0,590	MF16	2º	0,625	MF8	2º	0,750	MF14	2º	0,375	MF16	2º	0,500	MF19
7º	0,554	MF11	2º	0,625	MF16	2º	0,750	MF16	2º	0,375	MF19	3º	0,375	MF4
8º	0,529	MF18	2º	0,625	MF18	3º	0,625	MF3	3º	0,250	MF5	3º	0,375	MF5
9º	0,522	MF19	3º	0,500	MF13	3º	0,625	MF10	3º	0,250	MF6	3º	0,375	MF10
10º	0,506	MF13	3º	0,500	MF14	3º	0,625	MF11	3º	0,250	MF7	3º	0,375	MF11
11º	0,503	MF15	3º	0,500	MF15	3º	0,625	MF12	3º	0,250	MF12	3º	0,375	MF16
12º	0,497	MF3	3º	0,500	MF19	3º	0,625	MF15	3º	0,250	MF13	3º	0,375	MF17
13º	0,487	MF14	4º	0,375	MF1	3º	0,625	MF18	3º	0,250	MF14	3º	0,375	MF18
14º	0,458	MF10	4º	0,375	MF3	3º	0,625	MF19	3º	0,250	MF15	4º	0,250	MF8
15º	0,394	MF7	4º	0,375	MF5	4º	0,375	MF1	3º	0,250	MF17	4º	0,250	MF9
16º	0,375	MF1	4º	0,375	MF7	4º	0,375	MF6	3º	0,250	MF18	4º	0,250	MF13
17º	0,314	MF5	4º	0,375	MF10	4º	0,375	MF7	4º	0,125	MF1	5º	0,125	MF2
18º	0,285	MF6	5º	0,125	MF6	5º	0,250	MF5	4º	0,125	MF11	5º	0,125	MF14

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 9 - Variação da RC dos modos de falhas em cada cenário analisados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos nos quatro cenários indicam significativa diferença nos valores de *RC* das alternativas em relação aos valores da aplicação piloto, o que evidencia a alta influência que os valores dos pesos dos critérios têm sobre a priorização dos modos de falha. A maior diferença entre os valores de *RC* nos modos de falha é observada no cenário 2, quando o critério “severidade” recebe o valor máximo “muito alto” (MA).

De modo geral, notam-se algumas alterações na classificação dos modos de falhas em todos os cenários, ainda que algumas similaridades permaneçam. Nos cenários 1 (custo) e 2 (severidade), o MF4 permaneceu na primeira posição do *ranking*, tal qual a sua posição na aplicação piloto, ratificando que este é o modo de falha que deve ser tratado mais atentamente, mesmo considerando que tenha sido posicionado em segundo no cenário 3 (ocorrência) e em terceiro no cenário 4 (detecção), juntando-se a outros modos de falhas nessas posições. Destaque para o MF6 que ocupa a última posição na aplicação piloto e no cenário 1, e mostra uma alteração crescente de prioridade, ocupando a quarta posição no cenário 2, a terceira posição no cenário 3 e a segunda posição no cenário 4, a qual está acima da posição do MF4, considerado como o modo de falha detentor da mais alta prioridade.

Os resultados da análise de sensibilidade também revelaram uma redução na discriminação dos valores das alternativas, ou seja, há muitos valores de *RC* repetidos. Na aplicação piloto, obteve-se a discriminação de 18 em 19 valores possíveis enquanto que nos cenários 1, 2 e 4 foram obtidos cinco valores e no cenário 3 resultou em somente quatro valores discriminados de *RC* para os 19 modos de falhas.

Com o objetivo de melhor compreender essa redução da discriminação dos valores de *RC*, foi executada uma simulação com a utilização de uma escala linguística com sete termos para o julgamento da importância relativa dos critérios (pesos), sendo mantidas inalteradas todas as demais condições da aplicação piloto. O termo linguístico que expressa o valor máximo da importância relativa (peso), de acordo com a Figura 3 desta vez é o “extremamente alto” (EA). O termo EA foi atribuído de maneira alternada a cada um dos critérios, enquanto que para os demais eram atribuídos o termo “médio” (M) para cada um dos cenários. Os resultados demonstraram um aumento na discriminação dos valores de *RC*, o que contribui para a melhoria na priorização dos modos de falha (alternativas). A

Tabela 11 mostra os resultados da influência do uso da escala linguística de sete termos quando comparada com a escala de cinco termos quanto ao número de discriminações do *RC* dos modos de falhas.

Tabela 11 - Comparativo da discriminação de valores possíveis *RC* em relação às escalas utilizadas

Cenários	Número de discriminações em <i>RC</i>	
	Escala linguística com 5 termos	Escala linguística com 7 termos
Aplicação Piloto	18	19
Cenário 1	5	16
Cenário 2	5	14
Cenário 3	4	16
Cenário 4	5	17

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme relatado na seção 5.2.1, que trata da aplicação da etapa 1 do modelo, foram elaboradas e disponibilizadas duas escalas linguísticas, uma com sete e outra com cinco termos para que fossem utilizadas pelos decisores para o julgamento dos pesos dos critérios. Embora a preferência dos decisores tenha sido pelo uso da escala de cinco termos para o presente estudo, com base nos resultados da análise de sensibilidade verificou-se que com o uso da escala linguística contendo sete termos, resultou em melhores resultados no que tange a discriminação dos valores de *RC*, pois reduzem a quantidade de valores repetidos e dessa forma possibilitam a ordenação dos valores favorecendo a priorização dos modos de falhas. De acordo com os resultados obtidos nessa simulação, este estudo recomenda a utilização da escala com sete termos linguísticos para o julgamento dos pesos e das alternativas para maximizar a discriminação dos valores de *RC* das alternativas (modo de falhas).

Em suma, pode-se afirmar com base nos resultados que as alterações nos pesos dos critérios provocaram modificações importantes nos valores de *RC* e na posição dos modos de falha no *ranking*, atestando a importância de se considerar tais pesos durante o processo de avaliação de riscos. Adicionalmente, com a análise de sensibilidade, pode-se constatar também uma oportunidade de melhoria no procedimento do modelo por meio do uso de escalas linguísticas com sete termos para aumentar a capacidade de discriminação de valores de *RC*.

CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões do estudo, suas contribuições e limitações. Descreve ainda recomendações para estudos futuros ligados ao tema.

Este estudo apresentou uma nova abordagem para apoiar a avaliação e priorização de riscos em processos de fabricação industrial. O modelo de decisão combina o FMEA com o método *Hesitant Fuzzy-TOPSIS* desenvolvido por Beg e Rashid (2013). As saídas do modelo fornecem subsídios para formulação e implantação de planos de ação focados na mitigação ou eliminação dos modos de falhas prioritárias. Outra contribuição deste estudo para a literatura consiste no mapeamento das técnicas utilizadas nos modelos de priorização de riscos em processos de fabricação industriais baseados em FMEA.

Uma aplicação piloto do modelo foi conduzida no processo de fabricação de um componente elétrico com a participação de cinco especialistas experientes no uso do FMEA e oriundos de quatro áreas diferentes da empresa. Os resultados sugerem que o modo de falha “Decape com comprimento menor que o especificado” (MF4) seja tratado com a maior prioridade. Esse resultado foi ratificado por meio da análise de sensibilidade do modelo proposto.

A abordagem proposta é uma alternativa para contornar todas as limitações do FMEA descritas no Quadro 6. Nesse sentido, algumas das contribuições deste estudo para a avaliação e priorização de riscos em processos são: (1) permitir o uso de outros fatores de risco, além daqueles tradicionalmente usados no FMEA; (2) a possibilidade de considerar a importância relativa ou peso de cada critério selecionado; (3) ajuda a mitigar a repetição dos valores dos níveis de risco, potencializando a capacidade de priorização das alternativas; (4) a possibilidade de utilização de expressões linguísticas que consideram mais de um termo linguístico para expressar os julgamentos dos decisores, em situações de hesitação e incerteza, bastante comum em tomada de decisão envolvendo avaliação de risco; (5) suporte à tomada de decisão em grupo, de modo a considerar o conhecimento e a experiência de especialistas oriundos de diferentes áreas. Quando comparado aos modelos multicritério propostos por Ekmekçioğlu e Kutlu (2012) e também de Kutlu e Ekmekçioğlu (2012), que utilizam *Fuzzy-TOPSIS* para avaliação dos modos de falha, porém aplicam o *Fuzzy-AHP* para determinação dos pesos, o modelo proposto requer uma quantidade menor de

julgamentos dos especialistas para avaliação dos pesos. Além disso, o procedimento de determinação dos pesos é mais simples, fácil de compreender, não requer testes de consistência nem gera pesos nulos para os critérios. Outra contribuição é que, diferentemente da ampla maioria dos modelos mostrados no Quadro 7, este estudo considera os custos internos e externos das falhas como um fator determinante na priorização destas.

Sobre as limitações da proposta, uma vez que o modelo é voltado para situações de incerteza, pode apresentar a necessidade de se criar escalas adicionais para uso do modelo para lidar com valores numéricos exatos (como número de falhas expressos em ppm) como pontuações de entrada. Outra limitação do modelo proposto se referente ao número de termos linguísticos da escala, conforme constatado na análise de sensibilidade. O uso de escala linguística de cinco termos pode promover uma menor discriminação dos valores de RC (saída do modelo). A adoção de uma escala com sete termos linguísticos se mostrou mais adequada quanto ao número de discriminações dos valores de RC em comparação com a escala linguística de cinco termos apenas.

Estudos futuros podem aplicar o modelo em empresas de outros setores industriais para priorização de riscos de falhas potenciais e/ou conhecidas. Também pode ser adaptado para avaliação de riscos em empresas de serviços, de modo a considerar critérios específicos para estes ambientes, tais como a existência de mecanismos para recuperação de clientes. Além da análise de riscos em processos de fabricação, o modelo pode ser aplicado para avaliar e priorizar outros tipos de riscos, como aqueles relacionados à segurança, riscos ambientais, entre outros. Embora a implementação computacional em *Microsoft Excel*[®] contribua para transparência dos cálculos e facilite a replicação, o modelo também pode ser implementado na forma de *software* com interface gráfica para promover sua usabilidade.

REFERÊNCIAS

AHMADI, M.; MOLANA, S.M.H.; SAJADI, S.M. A hybrid FMEA-TOPSIS method for risk management, case study: Esfahan Mobarakeh Steel Company. **International Journal of Process Management and Benchmarking**, v. 7, n. 3, p. 397-408, 2017.

ALE, B.; AVEN, T.; JONGEJAN, R. B. Review and discussion of basic concepts and principles in integrated risk management. **Reliability, risk and safety: theory and applications**, p. 421-427, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 31000**. Gestão de riscos: diretrizes. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/IEC 31.010**. Gestão de riscos: técnicas para o processo de avaliação de riscos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9001**: Gestão da qualidade: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT, 2019. Disponível em <http://www.abnt.org.br/normalizacao/comites-tecnicos>. Acesso em 2 de Fevereiro de 2020.

AVEN, T. Risk Analysis: Assessing Uncertainties beyond Probabilities and Expected Values, **John Wiley & Sons, Ltd**, p. 6-7, 2008.

AVEN, T. Foundational issues in risk assessment and risk management. **Risk Analysis: An International Journal**, v. 32, n. 10, p. 1647-1656, 2012.

AVEN, T. Selective critique of risk assessments with recommendations for improving methodology and practise. **Reliability Engineering & System Safety**, v.96, p.509-514, 2011a.

AVEN, T. On the new ISO guide on risk management terminology. **Reliability engineering & System safety**, v. 96, n. 7, p. 719-726, 2011b.

AVEN, T.; RENN, O. On risk defined as an event where the outcome is uncertain. **Journal of risk research**, v. 12, n. 1, p. 1-11, 2009.

BANDUKA, N.; TADIĆ, D.; MAČUŽIĆ, I.; CRNJAC, M. Extended process failure mode and effect analysis (PFMEA) for the automotive industry: The FSQC-PFMEA. **Advances in Production Engineering & Management**, v. 13, n. 2, p. 206-215, 2018.

BEG, I.; RASHID, T. TOPSIS for hesitant fuzzy linguistic term sets. **International Journal of Intelligent Systems**, v. 28, n. 12, p. 1162-1171, 2013.

BERTRAND, J.; FRANSOO, J.C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

BOWLES, J.B.; PELÁEZ, C.E. Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 50, n. 2, p. 203-213, 1995.

BOZDAG, E.; ASAN, U.; SOYER, A.; SERDARASAN S. Risk prioritization in Failure Mode and Effects Analysis using interval type-2 fuzzy sets. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 8, p. 4000-4015, 2015.

CAN, G.F. An intuitionistic approach based on failure mode and effect analysis for prioritizing corrective and preventive strategies. **Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries**, v. 28, n. 3, p. 130-147, 2018.

CAO, X.; DENG, Y. A new geometric mean FMEA method based on information quality. **IEEE Access**, v. 7, p. 95547-95554, 2019.

CARPINETTI, L.C.R. **Gestão da qualidade: conceitos e técnicas**. 3 ed. Gen-Atlas, 2016.

CERTA, A.; ENEA, M.; GALANTE, G.M.; LA FATA, C.M. ELECTRE TRI-based approach to the failure modes classification on the basis of risk parameters: An alternative to the risk priority number. **Computers & Industrial Engineering**, v. 108, p. 100-110, 2017.

CEVIK ONAR, S.C; OZTAYSI, B.; KAHRAMAN, C. Strategic decision selection using hesitant fuzzy TOPSIS and interval type-2 fuzzy AHP: a case study. **International Journal of Computational intelligence systems**, v. 7, n. 5, p. 1002-1021, 2014.

CHANG, K.H.; CHENG, C.H. A risk assessment methodology using intuitionistic fuzzy set in FMEA. **International Journal of Systems Science**, v. 41, n. 12, p. 1457-1471, 2010.

CHANG, K.H; CHANG, Y.C; TSAI, I.T. Enhancing FMEA assessment by integrating grey relational analysis and the decision making trial and evaluation laboratory approach. **Engineering Failure Analysis**, v. 31, p. 211-224, 2013.

CHANG, K.H.; WEN, T.C.; CHUNG, H.Y. Soft failure mode and effects analysis using the OWG operator and hesitant fuzzy linguistic term sets. **Journal of Intelligent & Fuzzy Systems**, v. 34, n. 4, p. 2625-2639, 2018.

CHEN, C.T. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. **Fuzzy sets and systems**, v. 114, n. 1, p. 1-9, 2000.

CHEN, J.K. Prioritization of corrective actions from utility viewpoint in FMEA application. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 33, n. 4, p. 883-894, 2017.

CHIN, K.S.; CHAN, A.; YANG, J.B. Development of a fuzzy FMEA based product design system. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 36, n. 7-8, p. 633-649, 2008.

CURKOVIC, S.; SCANNELL, T.V.; WAGNER, B.J.; VITEK, M.J. Supply chain risk management within the context of coso's enterprise risk management framework. **Journal of Business Administration Research**, v. 2, n. 1, p. 15, 2013.

DELICE, E.K.; CAN, G.F. A stochastic approach for failure mode and effect analysis. **RAIRO-Operations Research**, v. 51, n. 4, p. 1077-1100, 2017.

DEWI, D.S.; SYAIRUDIN, B.; NIKMAH, E.N. Risk management in new product development process for fashion industry: case study in hijab industry. **Procedia Manufacturing**, v. 4, p. 383-391, 2015.

EKMEKÇIOĞLU, M.; KUTLU, A. A fuzzy hybrid approach for fuzzy process FMEA: An application to a spindle manufacturing process. **International Journal of Computational Intelligence Systems**, v. 5, n. 4, p. 611-626, 2012.

ENNOURI, W. Risks management: new literature review. **Polish journal of management studies**, v. 8, p. 288--297, 2013.

FATTAHI, R.; KHALILZADEH, M. Risk evaluation using a novel hybrid method based on FMEA, extended MULTIMOORA, and AHP methods under fuzzy environment. **Safety science**, v. 102, p. 290-300, 2018.

GARCÍA, A.; GILABERT, E. Mapping FMEA into Bayesian networks. **International Journal of Performability Engineering**, v. 7, n. 6, p. 525-537, 2011.

GERAMIAN, A.; MEHREGAN, M.R.; MOKHTARZADEH, N.G. Fuzzy inference system application for failure analyzing in automobile industry. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 2017.

GHOUSHCHI, S.J.; YOUSEFI, S.; KHAZAEILI, M. An extended FMEA approach based on the Z-MOORA and fuzzy BWM for prioritization of failures. **Applied Soft Computing**, p. 105505, 2019.

GUARNIERI, P. Síntese dos principais critérios, métodos e subproblemas da seleção de fornecedores multicritério. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 19, p. 1-25, 2015.

HAJIMOLAALI, M.; KEBRIAEEZADEH, A.; ABDOLLAHIASL, A.; SAFARI, H.; YEKTADOOST, A. A new approach in identifying and evaluating quality risks in the pharmaceutical industry. **Journal of Pharmaco economics and Pharmaceutical Management**, v. 3, n. 1/2, p. 17-20, 2017.

HAQ, I.; IZHAR, K.; ANWAR, S.; KHAN, M.; AHMED, B.; MAQSOOD, S. Fuzzy logic based failure mode and effect analysis of automotive powertrain assembly systems. **Technical Journal, University of Engineering and Technology (UET) Taxila**, 20 (SI), p. 57-64, 2015.

HWANG, C.L.; YOON, K. Methods for multiple attribute decision making. In: **Multiple attribute decision making**. Springer, Berlin, Heidelberg, 1981. p. 58-191.

HESSAMI, A.G. Risk management: a systems paradigm. **Systems Engineering: The Journal of The International Council on Systems Engineering**, v. 2, n. 3, p. 156-167, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. (2019). Recuperado em 15 de julho de 2019, de <https://www.iso.org/iso-31000-risk-management.html>.

KAHRAMAN, C. (Org.) Fuzzy Multicriteria Decision Making - Theory and Applications with Recent Developments. 1 ed. **Springer Science**: Turkey, 2008.

KUTLU, A.; EKMEKÇIOĞLU, M. Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 1, p. 61-67, 2012.

LEE, E.S.; LI, R.J. Comparison of fuzzy numbers based on the probability measure of fuzzy events. **Computers & Mathematics with Applications**, v. 15, n. 10, p. 887-896, 1988.

LI, Q.; XIE, L.; SONG, J.; LI, H.; XU, G. Research Methods and Applications of Gear Manufacturing Process Optimization. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2019.

LI, Y.L.; WANG, R.; CHIN, K.S. New failure mode and effect analysis approach considering consensus under interval-valued intuitionistic fuzzy environment. **Soft Computing**, v. 23, n. 22, p. 11611-11626, 2019.

LI, Z.; CHEN, L. A novel evidential FMEA method by integrating fuzzy belief structure and grey relational projection method. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 77, p. 136-147, 2019.

LIMA-JUNIOR, F.R.; CARPINETTI, L.C.R. Dealing with the problem of null weights and scores in Fuzzy Analytic Hierarchy Process. **Soft Computing**, p. 1-17, 2019.

LIMA-JUNIOR, F.R.; CARPINETTI, L.C.R. Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy-TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores. **Gestão e Produção, São Carlos**, v. 22, n. 1, p. 17-34, 2015.

LIMA JR., F.R.; OSIRO, L.; CARPINETTI, L.C.R. Métodos de decisão multicritério para seleção de fornecedores: um panorama do estado da arte. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 4, p. 781-801, 2013.

LIU, H.C; LIU, L.; BIAN, Q.; LIN, Q.; DONG, N.; XU, P. Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 4, p. 4403-4415, 2011.

LIU, H.C; LIU, L.; LIU, N. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. **Expert systems with applications**, v. 40, n. 2, p. 828-838, 2013.

LIU, H.C.; YOU, J.X.; SHAN, M.M.; SHAO, L. N. Failure mode and effects analysis using intuitionistic fuzzy hybrid TOPSIS approach. **Soft Computing**, v. 19, n. 4, p. 1085-1098, 2015

LIU, H.C.; YOU J.X.; LI, P.; SU, Q. Failure mode and effect analysis under uncertainty: An integrated multiple criteria decision making approach. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 65, n. 3, p. 1380-1392, 2016.

LIU, H.C.; CHEN, X.Q.; DUAN, C.Y.; WANG, Y.M. Failure mode and effect analysis using multi-criteria decision making methods: A systematic literature review. **Computers & Industrial Engineering**, 2019.

LO, H.W.; LIOU, J.J.H. A novel multiple-criteria decision-making-based FMEA model for risk assessment. **Applied Soft Computing**, v. 73, p. 684-696, 2018.

MAHMOODI, A. M.; MIRZAZADEH, A. A New Aanalysis of Failure Models and Effects by Fuzzy Todim with using Fuzzy Time Function. **International Journal of Fuzzy Logic System**, v. 4, n. 2, p. 7-21, 2014.

MALEKI, H.; SAADAT, Y. Comparison of failure mode and effects analysis by using AHP vs. REMBRANDT system. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, v. 14, n. 1, p. 5-19, 2013.

MANDEL, D.R. **Toward a concept of risk for effective military decision making**. DEFENCE RESEARCH AND DEVELOPMENT TORONTO (CANADA), 2007.

MARCONI, M.A.; LAKATOS, E.M. Fundamentos da Metodologia Científica. 7ª Edição-São Paulo: Atlas. 2010.

MARHAVILAS, Pan-K.; KOULOURIOTIS, D.; GEMENI, V. Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 24, n. 5, p. 477-523, 2011.

MARIA, A. Introduction to modeling and simulation. In: **Winter simulation conference**. 1997. p. 7-13.

MIGUEL, P.A.C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Production**, v. 17, n. 1, p. 216-229, 2007.

MUTLU, N.G.; ALTUNTAS, S.. Risk analysis for occupational safety and health in the textile industry: Integration of FMEA, FTA, and BIFPET methods. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 72, p. 222-240, 2019.

NUCHPHO, P.; NANSAARNG, S.; PONGPULLPONSAK, A. Modified Fuzzy FMEA Application in the Reduction of Defective Poultry Products. **Engineering Journal**, v. 23, n. 1, p. 171-190, 2019.

OLSSON, R. In search of opportunity management: Is the risk management process enough?. **International journal of project management**, v. 25, n. 8, p. 745-752, 2007.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **Fuzzy systems engineering: toward human-centric computing**. John Wiley & Sons, 2007.

PILLAY, A.; WANG, J. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 79, n. 1, p. 69-85, 2003.

PUENTE, J.; PINO R.; PRIORE P.; de la FUENTE D. A decision support system for applying failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 19, n. 2, p. 137-150, 2002.

PURDY, G. ISO 31000: 2009—setting a new standard for risk management. **Risk Analysis: An International Journal**, v. 30, n. 6, p. 881-886, 2010.

REN, F.; KONG, M.; PEI, Z. A new hesitant fuzzy linguistic TOPSIS method for group multi-criteria linguistic decision making. **Symmetry**, v. 9, n. 12, p. 289, 2017.

REZAAE, M.J.; YOUSEFI, S.; VALIPOUR, M.; DEHDAR, M.M. Risk analysis of sequential processes in food industry integrating multi-stage fuzzy cognitive map and process failure mode and effects analysis. **Computers & Industrial Engineering**, v. 123, p. 325-337, 2018.

RODRIGUEZ, R.M.; MARTINEZ, L.; HERRERA, F. Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v.20, n.1, p.109-119, 2012.

SALTELLI, A.; ALEKSANKINA, K.; BECKER, W.; FENNELL, P.; FERRETTI, F.; HOLST, N.; LI, S.; WU, Q. Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices. **Environmental modelling & software**, v. 114, p. 29-39, 2019.

SANCHEZ, H.; ROBERT, B.; BOURGAULT, M.; PELLERIN, R. Risk management applied to projects, programs, and portfolios. **International journal of managing projects in Business**, 2009.

SENVAR, O.; OTAY, I.; BOLTURK, E. Hospital site selection via hesitant fuzzy TOPSIS. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 12, p. 1140-1145, 2016.

SCHROEDER, H. An art and science approach to strategic risk management. **Strategic Direction**, v. 30, n. 4, p. 28-30, 2014.

SPREAFICO, C; RUSSO, D; RIZZI, C. A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents. **Computer Science Review**, v. 25, p. 19-28, 2017.

SUSTEROVA, M.; LAVIN, J.; RIIVES, J. Risk management in product development process. **Annals of DAAAM**, v. 23, n. 1, p. 225-228, 2012.

TIXIER, J.; DUSSERE, G.; SALVI, O.; GASTON, D. Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. **Journal of Loss Prevention in the process industries**, v. 15, n. 4, p. 291-303, 2002.

TORRA, V.; NARUKAWA, Y. On hesitant fuzzy sets and decision. In: **2009 IEEE International Conference on Fuzzy Systems**. IEEE, 2009. p. 1378-1382.

TORRA, V. Hesitant fuzzy sets. **International Journal of Intelligent Systems**, v. 25, n. 6, p. 529-539, 2010.

WANG, C.H. A novel approach to conduct risk analysis of FMEA for PCB fabrication process. *In: IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. IEEE, 2011. p. 1275-1278.

WANG, W.; LIU, X.; QIN, Y.; FU, Y. A risk evaluation and prioritization method for FMEA with prospect theory and Choquet integral. **Safety science**, v. 110, p. 152-163, 2018.

WILLIAMS, R.; BERTSCH, B.; DALE, B.; WIELE, T.; IWAARDEN, J.; SMITH, M.; VISSER, R. Quality and risk management: what are the key issues?. **The TQM magazine**, v. 18, n. 1, p. 67-86, 2006.

XIAO, N.; HUANG, H.; LI, Y.; HE, L.; JIN, T. Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA. **Eng. Failure Analysis**, v.18, p.1162-1170, 2011.

XU, K.; TANG, L.C.; XIE, M.; HO, S.L.; ZHU, M.L. Fuzzy assessment of FMEA for engine systems. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 75, n. 1, p. 17-29, 2002.

YOUSEFI, S.; ALIZADEH, A.; HAYATI, J.; BAGHERY, M. HSE risk prioritization using robust DEA-FMEA approach with undesirable outputs: a study of automotive parts industry in Iran. **Safety science**, v. 102, p. 144-158, 2018.

YU, D. Triangular hesitant fuzzy set and its application to teaching quality evaluation. **JOURNAL OF INFORMATION & COMPUTATIONAL SCIENCE**, v. 10, n. 7, p. 1925-1934, 2013.

ZADEH, L.A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.

ZADEH, L.A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. **IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics**, v. 3, p. 28–44, 1973.

ZHAO, H.; YOU, J.X.; LIU, H.C. Failure mode and effect analysis using MULTIMOORA method with continuous weighted entropy under interval-valued intuitionistic fuzzy environment. **Soft Computing**, v. 21, n. 18, p. 5355-5367, 2017.

APÊNDICE A – ROTEIRO UTILIZADO NA PESQUISA DE CAMPO

Objetivo: Identificação e avaliação dos riscos de um processo de fabricação industrial previamente selecionado. Com base no modelo conceitual, as seguintes atividades são necessárias:

1. Formar uma equipe multidisciplinar, composta de especialistas no processo sob estudo e de gestores da organização, os quais atuarão como tomadores de decisão.
2. A primeira atribuição dos decisores é definir o escopo da aplicação, ou seja, escolher qual processo será analisado, explicitar sua função e analisar as atividades que o compõem. Recomenda-se o estudo do processo mais crítico e que apresenta uma maior incidência de problemas relativos aos modos de falhas.
3. Por meio de sessões de *brainstorming*, embasadas na experiência dos membros da equipe, da análise da documentação e registros de processos similares, devem ser identificados e descritos os modos de falhas potenciais ou conhecidos do processo selecionado.
4. Elaboração de duas escalas linguísticas baseadas no *hesitant fuzzy linguistic term sets* (HFLTTS), uma com cinco e outra com sete termos para serem utilizadas nos julgamentos dos pesos dos critérios e das alternativas (modos de falhas). Essas escalas serão construídas de acordo a literatura e a escolha de qual será aplicada deve ser de acordo com as preferências dos decisores.
5. Definir quais serão os critérios usados no estudo, bem como, atribuir a importância relativa (peso) de cada um desses critérios pelo uso da escala linguística escolhida. Quatro critérios foram sugeridos inicialmente com base na literatura e cabe aos gestores, a responsabilidade pela decisão final sobre a importância relativa de cada um deles na aplicação do modelo. Os critérios selecionados devem estar relacionados aos fatores que

possam mensurar o impacto das falhas para o cliente final e a organização como um todo. Tais critérios também devem estar associados aos fatores que direcionam a implementação de ações para eliminar ou mitigar os riscos envolvidos.

6. Avaliação e pontuação para cada modo de falha descrito (alternativa) em relação a cada um dos critérios selecionados. Essa avaliação faz uso da escala linguística escolhida anteriormente e deve levar em conta a experiência dos membros da equipe, o histórico de processos similares e demais informações disponíveis.

CRONOGRAMA

Favor preencher com a data final de conclusão para os itens de 1 a 3. Na sequência os itens de 4 a 6 serão ajustados em função destes primeiros prazos.

Cronograma da etapa 1 do modelo

No.	Atividade	Executor	Prazo	Status
1	Formar Equipe	Gestor		
2	Definir Escopo do Processo	Gestor		
3	Identificar Modos de Falhas	Gestor		
4	Elaborar Escalas Linguísticas	Pesquisador		
5	Definir Critérios e Pesos	Gestor+Pesquisador		
6	Pontuar Alternativas	Gestor		

A seguir são apresentados os roteiros com as questões e informações necessárias para execução das atividades. Favor preencher com as informações solicitadas.

ATIVIDADE 1: FORMAR EQUIPE

- a) Quantos especialistas/decisores farão parte da equipe?
- b) Listar o nome dos especialistas/decisores (não será divulgado na pesquisa)
- c) Quais são as áreas de atuação de cada especialista/decisor?
- d) Qual o tempo de vínculo com a empresa?
- e) Qual o tempo de atuação/experiência do especialista na execução do FMEA tradicional na empresa?

ATIVIDADE 2: DEFINIR ESCOPO DO PROCESSO

- a) Qual produto final resulta dos processos de fabricação?
- b) Liste a sequência dos processos de fabricação.
- c) Qual destes processos foi selecionado para o estudo?
- d) Quais são as justificativas para essa escolha?

ATIVIDADE 3: IDENTIFICAR OS MODOS DE FALHAS

- a) Esta atividade deve ser executada em reuniões específicas da equipe e deve produzir os resultados através de “brainstorming” e consenso da equipe utilizando como fonte de dados o histórico do processo.
- b) Listar os modos de falhas conhecidos (com base em ocorrências já conhecidas) ou potenciais (constatados na análise do presente estudo ou sem registro prévio). Listar os modos de falhas na sequência que eles podem ocorrer no processo.

ATIVIDADE 4: ESCALAS LINGUÍSTICAS

- a) Atividade a cargo do pesquisador com posterior explanação para a equipe que fará uso dessas escalas na execução das atividades a seguir;
- b) Elaboradas com base em Rodrigues, Martinez e Herrera (2012).

ATIVIDADE 5: DEFINIR CRITÉRIOS E PESOS

- a) O pesquisador propõe com base no referencial teórico, quatro critérios para serem discutidos com a equipe, em reunião específica. Os critérios foram extraídos da revisão sistemática da literatura. Critérios: *Severidade, Ocorrência, Detecção e Custo*.
- b) A partir da definição dos critérios, cada decisor deve julgar e determinar a importância relativa de cada critério pontuando segundo as escalas linguísticas de cinco e de sete termos elaborados previamente.

ATIVIDADE 6 PONTUAR ALTERNATIVAS

- a) Em reunião específica, cada especialista deve analisar os modos de falhas em relação aos critérios selecionados e julgar (com base em seu conhecimento e experiência) utilizando os cinco termos dados pela escala linguística previamente elaborada. Nessa etapa também poderão ser usadas expressões linguísticas (um ou mais termos linguísticos para cada avaliação);
- b) Estes julgamentos serão inseridos no modelo computacional para obtenção da priorização dos riscos.