

CARLOS AUGUSTO GABRIEL MENEZES

FMEA de processo na indústria automotiva: uma análise sobre a aplicação do
Número de Prioridade de Risco (RPN)

Carlos Augusto Gabriel Menezes

**FMEA de processo na indústria automotiva: uma análise sobre a aplicação do
Número de Prioridade de Risco (RPN)**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na área de Gestão e Otimização.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins.

Coorientador: Prof. Dr. Ualison Rébula de Oliveira.

M543f Menezes, Carlos Augusto Gabriel
FMEA de processo na Indústria automotiva : uma análise sobre a aplicação do número de prioridade de Risco (RPN) / Carlos Augusto Gabriel Menezes – Guaratinguetá, 2020.
107 f : il.
Bibliografia: f. 75-83

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020.
Orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins
Coorientador: Prof. Dr. Ualison Rébula de Oliveira

1. Controle de processo. 2. Avaliação de riscos. 3. Processo decisório. 4. Indústria automobilística. I. Título.


CDU 658.511.3(043)

CARLOS AUGUSTO GABRIEL MENEZES

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

PROGRAMA: ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO: Mestrado Acadêmico

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Otávio José de Oliveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. FERNANDO AUGUSTO SILVA MARINS
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. ANEIRSON FRANCISCO DA SILVA
UNESP-FEG


Prof. Dr. ROBERTO CAMPOS LEONI
AMAN

DADOS CURRICULARES

CARLOS AUGUSTO GABRIEL MENEZES

NASCIMENTO	26.05.1954 – Volta Redonda / RJ
FILIAÇÃO	Zeildo Menezes Pereira Clélia Gabriel Menezes
1975/1979	Engenharia Civil Fundação Educacional Rosemar Pimentel, FERP
2002/2003	Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ.

Dedico este trabalho de modo especial, à minha
família pela compreensão, incentivo e apoio!

AGRADECIMENTOS

A Deus e minha santa de devoção, Santa Terezinha, por me darem forças acolhendo minhas orações nos momentos em que precisei de apoio para seguir em frente mesmo enfrentando situações de grandes desafios físicos e emocionais;

Às minhas filhas Gabrielle, Isabela, Clarissa, meu filho Arthur e minha neta Elis por compreenderem que neste período eu não tinha como lhes dar a atenção de sempre;

À minha esposa Ana Paula por suprir a minha ausência me representando sempre junto a todos os nossos amigos e familiares, e principalmente se fazendo presente na educação do Arthur cumprindo sua parte e a minha em qualquer situação que ele precisasse;

À minha mãe, minhas irmãs e irmãos pelo incentivo constante e por compreenderem minha ausência no convívio muito próximo que sempre tivemos;

Ao professor e amigo Dr. Ualison Rébula por ter acreditado que eu conseguiria concluir o Mestrado e por sua exigência de que fosse da melhor forma possível, principalmente pelas orientações nesta reta final dedicando um tempo além do que teria disponível, e por nunca ter desistido mesmo sabendo que seria uma árdua tarefa;

Ao meu Orientador, professor Dr. Fernando Marins pelas orientações acadêmicas e pessoais, sempre muito atencioso não medindo esforços para que a conclusão deste Mestrado se tornasse uma realidade, em especial por sua compreensão e incentivo para que eu superasse as dificuldades que enfrentei;

Aos professores Dr. Roberto Leoni e Dr. Aneirson por aceitarem participar de minha banca garantindo assim uma contribuição extra para que eu conclua o Mestrado com uma Dissertação de grande relevância;

À AEDB por sempre me proporcionar o apoio que solicitei nos momentos em que precisei me dedicar de forma mais consistente aos trabalhos de produção de minha Dissertação;

Aos professores e amigos do GEMAA que sempre me incentivaram com palavras e atitudes para que eu conseguisse concluir este Mestrado sem deixar de cumprir com excelência as minhas tarefas de docente.

RESUMO

Com a exigência cada vez maior do consumidor por produtos e serviços isentos de falhas, as organizações buscam manter seu valor competitivo fazendo uso de metodologias e ferramentas que assegurem e aperfeiçoem seus processos. A FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) tem provado ser uma ferramenta eficaz na antecipação e diminuição da possibilidade de falha, entretanto, o método convencional de cálculo do RPN (*Risk Priority Number*) tem sido criticado extensivamente na literatura por não se considerar a importância relativa entre os três fatores de risco (Severidade, Ocorrência e Detecção). Nesse contexto, a presente pesquisa tem por objetivo principal identificar o grau de prioridade a ser atribuído a cada um dos três fatores de risco. Metodologicamente essa pesquisa foi suportada por um estudo de campo, onde 16 funcionários que atuam no setor automotivo e aplicam efetivamente a FMEA participaram de uma pesquisa utilizando o AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Como resultados principais, observa-se a existência de uma diferença significativa a favor da Severidade.

PALAVRAS-CHAVE: FMEA de processo. Indústria automotiva. Análise de riscos. Fatores de risco. AHP.

ABSTRACT

With increasing demand by consumers for products and services free of flaws, organizations try to maintain their competitive value by using methods and tools to enable improvement of their processes. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) has proven to be effective for the anticipation and avoidance of failures, but the conventional method of calculating its Risk Priority Number (RPN) has been widely criticized in the literature for not considering the relative importance of the three risk factors (severity, occurrence and detection). In this context, the main objective of this article is to identify the priority degree to be attributed to each of those three risk factors. Methodologically, it is based on a field study where 16 employees in the automotive sector who apply FMEA took part in a survey, with their responses submitted to the Analytic Hierarchy Process (AHP). The main result was the existence of a significant difference in favor of severity.

KEYWORDS: Process FMEA. Automotive industry. Risk analysis. Risk factors. AHP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Procedimento para elaboração da FMEA	25
Figura 2 – Formulário FMEA de processo	26
Figura 3 – Estrutura hierárquica do AHP	42
Figura 4 – Etapas da Pesquisa	48
Figura 5 – Agrupamento dos artigos pesquisados	49
Figura 6 – Estrutura hierárquica usada na pesquisa	54
Quadro 1 – Aspectos positivos atribuídos à FMEA	28
Quadro 2 – Diferentes áreas de aplicação da FMEA.....	31
Quadro 3 – Críticas à FMEA na sua forma tradicional	33
Quadro 4 – Escala Fundamental de Saaty	43
Quadro 5 – Definição dos critérios usados no questionário	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de comparação entre Critérios.....	42
Tabela 2 – Matriz de comparação entre Critérios preenchida	44
Tabela 3 – Índice de Consistência Aleatória.....	45
Tabela 4 – Matriz de comparação com valor inconsistente.....	46
Tabela 5 – Matriz de Perturbações	47
Tabela 6 – Análise de Especialistas que trabalham com FMEA	51
Tabela 7 – Área de atuação e função atual dos Especialistas	52
Tabela 8 – Tempo de experiência dos Especialistas	52
Tabela 9 – Matriz de comparação montada para preenchimento	55
Tabela 10 – Matriz de comparação paritária dos critérios.....	57
Tabela 11 – Resultado do cálculo do Autovetor	58
Tabela 12 – Resultado do cálculo da Prioridade Relativa	58
Tabela 13 – Resultado do cálculo do Vetor Peso.....	59
Tabela 14 – Resultado do cálculo do Vetor de Consistência	59
Tabela 15 – Análise da ocorrência de inconsistências na comparação de critérios.....	60
Tabela 16 – Matriz de Perturbações na comparação de critérios	61
Tabela 17 – Taxa de Consistência (CR) obtida na comparação dos Critérios.....	61
Tabela 18 – Matriz de comparação paritária das alternativas.....	62
Tabela 19 – Resultado do cálculo do Autovetor	62
Tabela 20 – Resultado do cálculo da Prioridade Relativa	63
Tabela 21 – Resultado do cálculo do Vetor de Consistência	63
Tabela 22 – Análise da ocorrência de inconsistências na comparação das Alternativas	64
Tabela 23 – Taxa de Consistência (CR) obtida na comparação das Alternativas.....	64
Tabela 24 – Valores da Prioridade Local para os critérios.....	65
Tabela 25 – Valores da Prioridade Local para as alternativas	66
Tabela 26 – Valores da Prioridade Global	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ART	<i>Adaptive Resonance Theory</i>
BS EN IEC 60812	Norma do <i>British Standards Institute</i>
CI	Índice de Consistência
CR	Taxa de Consistência
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>
DEMATEL	<i>Decision Making Trial and Evaluation Laboratory</i>
ER	<i>Evidential Reasoning</i>
FDMS	<i>Fuzzy Decision Making System</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
GRA	<i>Grey Relational Analysis</i>
GRP	<i>Grey Relational Projection</i>
IATF 16949	Norma do Sistema de Gestão da Qualidade da Indústria Automotiva
IEC 60812	Norma da <i>International Electrotechnical Commission</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
MIL-STD 1629A	Norma do <i>Department of Defense, USA</i>
MRA	<i>Minimax Regret Approach</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NRC	<i>Nuclear Regulatory Commission</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PSA	<i>Peugeot Société Anonyme</i>
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
SAE-J1739	Norma da <i>Society of Automotive Engineers</i>
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
UGF	<i>Universal Generating Function</i>
VIKOR	<i>ViseKriterijumska Optimizacija i Kompromisno Resenje</i>
VW	<i>Volkswagen</i>
WOS	<i>Web of Science</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E QUESTÕES DE PESQUISA	13
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA E SUA RELEVÂNCIA	16
1.3	CONJECTURAS, MATERIAIS E MÉTODOS	17
1.4	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA E ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1	HISTÓRICO	19
2.2	ASPECTOS CONCEITUAIS E TEÓRICOS SOBRE A FMEA	19
2.3	TIPOS DE FMEA	21
2.3.1	FMEA de Projeto (<i>Design FMEA</i>)	21
2.3.2	FMEA de Processo (<i>Process FMEA</i>)	22
2.3.3	As principais diferenças entre os dois tipos de FMEA	22
2.4	PROCEDIMENTO PARA ELABORAÇÃO DA FMEA	23
2.5	ASPECTOS POSITIVOS ATRIBUÍDOS À FMEA	27
2.6	CRÍTICAS AO USO DA FMEA NA SUA FORMA TRADICIONAL	32
2.7	PROPOSTAS DE CÁLCULO DO RPN ENCONTRADAS NA LITERATURA	34
2.8	O MÉTODO AHP	39
2.8.1	Considerações gerais	39
2.8.2	Estruturação do problema	41
2.8.3	Construção das Matrizes de Comparação	42
2.8.4	Teste de Consistência	44
2.8.5	Cálculo da Prioridade Global	47
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	48
3.1	CLASSIFICAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA	48
3.2	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	49
3.3	APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP	50
3.3.1	Empresas selecionadas para a pesquisa de campo	50
3.3.2	Seleção dos especialistas entrevistados	51
3.3.3	Definição do problema e estruturação da hierarquia	53
3.3.4	Construção das Matrizes de Comparação	55
3.3.5	Elaboração dos questionários	55
3.3.6	Aplicação do questionário AHP	56

4	RESULTADOS DA PESQUISA EMPÍRICA	57
4.1	DETERMINAÇÃO DAS PRIORIDADES RELATIVAS PARA OS CRITÉRIOS	57
4.2	DETERMINAÇÃO DAS PRIORIDADES RELATIVAS PARA AS ALTERNATIVAS	62
4.3	CÁLCULO DAS PRIORIDADES GLOBAIS	65
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	67
5.1	ASPECTOS RELATIVOS À REVISÃO DA LITERATURA	67
5.2	ASPECTOS RELATIVOS À PESQUISA EMPÍRICA	69
6	CONCLUSÕES	71
6.1	QUANTO A REVISÃO DA LITERATURA	71
6.2	QUANTO A QUESTÃO PROBLEMA E AS CONJECTURAS.....	72
6.3	QUANTO AOS OBJETIVOS E AOS RESULTADOS EMPÍRICOS.....	73
6.4	QUANTO A RECOMENDAÇÕES DE PESQUISAS FUTURAS.....	74
	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICE A – Questionário com informações sobre os Especialistas	84
	APÊNDICE B – Questionário de comparação dos Critérios	85
	APÊNDICE C – Questionário de comparação das Alternativas	87
	APÊNDICE D – Matriz de comparação paritária dos Critérios	89
	APÊNDICE E – Matriz de comparação paritária das Alternativas para o Critério 1	93
	APÊNDICE F – Matriz de comparação paritária das Alternativas para o Critério 2	96
	APÊNDICE G – Matriz de comparação paritária das Alternativas para o Critério 3	99
	APÊNDICE H – Matriz de comparação paritária das Alternativas para o Critério 4	102
	APÊNDICE I – Matriz de comparação paritária das Alternativas para o Critério 5	105

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada a introdução do trabalho iniciando com uma contextualização do problema que servirá de base para definir a questão de pesquisa, em seguida os objetivos a serem alcançados, sua relevância e as conjecturas, com a descrição dos materiais e métodos que foram seguidos para sua consolidação e, para concluir, quais as delimitações estabelecidas e a forma de estruturação do trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E QUESTÕES DE PESQUISA

Na visão de Porter (2004), a maior exigência do consumidor em relação a produtos de qualidade e preços atraentes, faz com que as organizações busquem um maior valor competitivo nos segmentos onde atuam reavaliando suas estratégias internas.

Considerando como primordial a empresa apresentar melhor resultado econômico, a busca permanente por inovações e condições competitivas, buscando soluções em seus processos e aplicando adequadamente seus recursos, passou a ser condição de sobrevivência no cenário contemporâneo.

De acordo com Santos, de Oliveira e Rocha (2018) a probabilidade de que as coisas saiam erradas existe e por isso, as empresas precisam saber identificar as possíveis causas das falhas e medir seu impacto, dando prioridade às mais críticas, pois algumas podem ser apenas incidentais sem gravidade enquanto outras podem causar consequências catastróficas.

A FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), desenvolvida na década de 40, é considerada até os dias atuais como uma ferramenta altamente eficaz de antecipação e diminuição da possibilidade de falha durante o processo de design ou fabricação, colaborando para a redução ou eliminação de recalls de produtos que apresentaram falhas de projeto ou fabricação. Sendo ela uma abordagem estruturada para descobrir possíveis imperfeições que podem levar a desperdícios, defeitos ou resultados prejudiciais ao cliente, constatou-se sua relevância e eficácia para identificar, priorizar e limitar os potenciais modos de falhas. A FMEA não substitui a engenharia e suas especificidades, porém, aprimora os resultados, aplicando o conhecimento e a experiência de uma equipe multifuncional preparada para analisar o progresso do projeto de um produto e a realização de um processo, avaliando seus riscos de falhas.

A FMEA é uma ferramenta preventiva que se propõe a gerenciar riscos por meio da identificação de potenciais falhas associadas a cada etapa de um processo (AFSHARI; ISSA; RADWAN, 2016), sendo também reconhecida como uma técnica de engenharia usada para

definir, identificar e eliminar problemas conhecidos e potenciais do sistema, projeto, processo e serviço antes que eles cheguem ao cliente (BIN YUSOF; ABDULLAH, 2016).

Banduka, Veza e Bilic (2016) afirmam que o objetivo principal da FMEA é identificar potenciais falhas, avaliar as causas e os efeitos destas e propor soluções para evitar sua ocorrência, tendo como objetivo final obter um produto livre de falhas no processo de produção e durante seu uso pelo cliente. Quanto mais cedo uma falha for descoberta, menor será o custo de sua correção. Se uma falha for descoberta no final do desenvolvimento ou no lançamento do produto, o impacto será exponencialmente mais devastador.

Quanto a sua evolução, a FMEA foi documentada pela primeira vez em 1949, pelo Exército dos Estados Unidos, no procedimento *MIL-STD-1629A* (PENTTI; ATTE, 2002), e proposto como uma metodologia de projeto formal pela NASA em 1963 (CHANG; WEI; LEE, 1999). Em 1975 foi utilizada pelo setor nuclear e em 1978 a *Ford Company* a integrou em seu conceito de garantia da qualidade (CLARKE, 2005). Na década de 1980, as empresas automotivas que formam a AIAG (*Automotive Industry Action Group*) incorporaram a FMEA em seus processos de desenvolvimento de produtos (BERTSCHE, 2008).

Como aspectos positivos atribuídos a FMEA, a literatura destaca que é um método importante para o gerenciamento preventivo da qualidade (PETER; ROSNER, 1999), se destaca como uma das técnicas formais para o desenvolvimento eficaz de produtos (HUANG; SHI; MAK, 2000), tem sido amplamente utilizado para examinar potenciais falhas em produtos, processos, projetos e serviços (WANG *et al.*, 2009), com o tempo tornou-se cada vez mais importante no desenvolvimento de novos produtos, fabricação ou aplicações de engenharia (ZHANG; CHU, 2011) e que é uma técnica amplamente utilizada para definir, identificar e eliminar falhas conhecidas ou potenciais, erros e riscos (DU *et al.*, 2016).

Da mesma forma, constatou-se que, além da área automotiva e espacial, tem sido muito utilizada para a análise de segurança e confiabilidade em uma ampla gama de atividades (LIU *et al.*, 2014) como na análise de riscos em sistemas marinhos (PILLAY; WANG, 2003), na indústria de alta tecnologia para garantir a robustez do processo (CHANG *et al.*, 2012), na indústria de alimentos, proporcionando uma abordagem mais confiável para a avaliação de risco (ARVANITTOYANNIS; SAVELIDES, 2007) e na área de manutenção preventiva, sendo usado como base para o projeto e priorização de suas atividades (BRAAKSMA; KLINGENBERG; VELDMAN, 2013).

A metodologia FMEA foi aplicada para a avaliação de risco dos sistemas de serviços básicos de alimentação (OZILGEN, 2010) e, também provou ser uma metodologia prospectiva de garantia de qualidade cada vez mais utilizada nos cuidados de saúde (ASHLEY;

ARMITAGE; TAYLOR, 2017), por apresentar uma abordagem sistemática que incorpora uma série de ferramentas de engenharia industrial, podendo ser aplicada proativamente nas organizações de cuidados de saúde para melhorar os resultados do processo, melhorando a segurança do paciente, o rendimento dos processos e reduzindo o custo (RATH, 2008).

A FMEA, usada na sua forma tradicional, provou ser uma das mais importantes ferramentas preventivas em sistemas, projetos, processos ou serviços para evitar que falhas e erros ocorram e cheguem ao cliente (LIU *et al.*, 2013), mas o método convencional de cálculo do Número de Prioridade de Risco (*Risk Priority Number* - RPN) tem sido criticado extensivamente na literatura por não levar em consideração a importância relativa entre os três fatores de risco, Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D) (LIU *et al.*, 2016a; CHIN *et al.*, 2009; PILLAY; WANG, 2003); diferentes combinações de S, O e D podem gerar valores idênticos de RPN com implicação de risco totalmente diferente (CERTA *et al.*, 2017; ZHANG; CHU, 2011); os três fatores de risco são difíceis de serem avaliados com precisão (LIU *et al.*, 2016b; XU *et al.*, 2002); a escala RPN não é contínua limitando em 120 os resultados que podem ser gerados com a multiplicação de S, O e D (BOZDAG *et al.*, 2015; CHIN *et al.*, 2009); e o RPN ignora aspectos econômicos, considerando apenas riscos de falhas (CERTA *et al.*, 2017; CHIN *et al.*, 2009).

Como proposta para solucionar ou mitigar estas deficiências apresentadas, a literatura consultada sugere uma série de propostas alternativas que podem ser utilizadas em conjunto com a FMEA como por exemplo simulação *De Monte Carlo* (BEVILACQUA; BRAGLIA; GABRIELLI, 2000), DEMATEL (*Decision Making Trial and Evaluation Laboratory*) (SEYED-HOSSEINI; SAFAEI; ASGHARPOUR, 2006), DEA (*Data Envelopment Analysis*) (REZAEI; SALIMI; YOUSEFI, 2017), Teoria *Grey* (LIU *et al.*, 2014), AHP (*Analytic Hierarchy Process*) (CHEN; WU, 2013) e Lógica *Fuzzy* (PILLAY; WANG, 2003).

Uma vez identificada a existência deste questionamento quanto à eficácia da FMEA na sua forma original, tendo como destaque o fato dos 3 fatores de risco serem avaliados com um mesmo peso ao se calcular o RPN, este trabalho tem por princípio responder a seguinte questão de pesquisa: Qual a importância relativa de cada um dos 3 fatores de risco (Severidade, Ocorrência e Detecção) dentro do cálculo do RPN na aplicação da FMEA?

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA E SUA RELEVÂNCIA

Com base na fragilidade sobre o cálculo do RPN, representada por diversos autores (PILLAY; WANG, 2003; WANG *et al.*, 2009; TAY; LIM, 2010; CHANG *et al.*, 2012; LIU *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2015a; BANDUKA; VEZA; BILIC, 2016; TOORANLOO; AYATOLLAH, 2016) a presente pesquisa tem por objetivo principal identificar o grau de prioridade a ser atribuído a cada um dos três fatores de risco do RPN (S, O e D), usando como base o que tem sido discutido na literatura sobre o tema e a opinião de profissionais que possuem experiência inquestionável na aplicação e uso da FMEA em suas organizações.

Para realização do objetivo principal, os seguintes objetivos específicos foram desenvolvidos na pesquisa:

- a) Levantar, na literatura, aspectos que podem ser melhorados no desenvolvimento e aplicação da FMEA, observando lacunas que possam ser eliminadas ou mitigadas com a presente pesquisa;
- b) Identificar na literatura propostas sugeridas por pesquisadores para melhoria da FMEA e analisar sua aplicabilidade prática;
- c) Levantar a percepção de especialistas, que efetivamente trabalham com FMEA na indústria automotiva, sobre a importância relativa dos três fatores de risco do RPN, ou seja, Severidade, Ocorrência e Detecção.

Tendo em vista a dificuldade de se encontrar publicações que mostram informações detalhadas de como se aplicar o Método AHP (Analytic Hierarchy Process) em todas as suas fases, a presente pesquisa também se propôs a demonstrar, passo a passo, como se realiza a aplicação dessa ferramenta, com a finalidade de contribuir com outros pesquisadores.

Tal objetivo teve o cuidado de evidenciar a descrição do processo de utilização do AHP na Revisão da Literatura e incluir um exemplo prático no capítulo de Resultados, complementando com os questionários e as matrizes de comparação que são apresentadas nos Apêndices.

Esta pesquisa é relevante porque a FMEA é reconhecida mundialmente como uma ferramenta indispensável para a detecção de falhas (WANG *et al.*, 2009; DU *et al.*, 2016) atuando de forma proativa evitando suas ocorrências (BANDUKA; VEZA; BILIC, 2016), mas pesquisadores apontam problemas na aplicação do cálculo do RPN na sua forma original (PILLAY; WANG, 2003; TAY; LIM, 2010; CHANG *et al.*, 2012; LIU *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2015a; TOORANLOO; AYATOLLAH, 2016). Existindo questionamentos quanto a sua acuracidade, esta lacuna precisa ser entendida.

1.3 CONJECTURAS, MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa trabalha com o método hipotético-dedutivo, onde o problema de pesquisa surge de conflitos aliados a teorias e em seguida é proposta uma solução (uma conjectura) que é passível de refutação ou confirmação a partir da observação e experimentação (MARCONI; LAKATOS, 2004) para guiar o pesquisador.

A conjectura é uma proposição compatível com o conhecimento existente (MARCONI; LAKATOS, 2004). Richardson (1999) define conjecturas como soluções tentativas do problema de pesquisa selecionadas previamente que vão orientar a análise dos dados.

Como primeira conjectura, acredita-se que existe fundamento na preocupação da AIAG (AIAG, 2008) recomendando atenção especial quando a Severidade apresentar valores de 9 ou 10, haja visto que ela tem relação direta com as consequências percebidas ou experimentadas pelos clientes internos e externos.

Algumas das técnicas recomendadas para análise de riscos como Análise Preliminar de perigos (APP), Análise de impactos nos negócios (BIA), Análise de árvore de falhas (FTA), Análise de árvore de eventos (ETA) e Avaliação da confiabilidade humana (ACH) se preocupam em avaliar as consequências geradas pelas falhas e as probabilidades de que elas aconteçam. Desta forma, como segunda conjectura, acredita-se que a Severidade e a Ocorrência apresentam maior relevância do que a Detecção.

Outra conjectura é que, apesar de existirem propostas alternativas visando reduzir as críticas atribuídas ao cálculo do RPN, as técnicas ou métodos propostos exigem, além de um tempo maior para sua aplicação, uma especialização dos profissionais que aplicam a FMEA, o que nem sempre é possível ter disponível nas empresas.

Com relação aos seus métodos e, para o alcance dos objetivos aqui descritos, a pesquisa contou com 6 etapas:

- I) Definição dos critérios de busca;
- II) Definição da base de dados para busca dos artigos;
- III) Seleção dos artigos;
- IV) Revisão da Literatura;
- V) Aplicação do AHP com especialistas sobre o grau de importância da S, O e D;
- VI) Observação e análise dos resultados.

No capítulo 3 serão fornecidos mais detalhes sobre o desenvolvimento do método.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA E ESTRUTURA DO TRABALHO

Com relação à revisão da literatura, especificamente na parte referente ao aprofundamento nos aspectos relacionados à FMEA, foi realizada uma busca utilizando a base de dados *Web of Science* (WOS) por artigos que abordassem a ferramenta em questão e o cálculo do RPN. Como resultado foram obtidos 142 artigos que foram analisados para escolha apenas daqueles que tinham como proposta a aplicação da FMEA em processos e tratassem da subjetividade do cálculo do RPN.

Para realização da pesquisa empírica, escolheu-se empresas do setor automotivo por seu impacto na economia nacional, proporcionando em 2017 um faturamento da ordem de 59 bilhões de dólares, gerando 55 bilhões de reais em tributos diretos com a geração de 1,3 milhões de empregos diretos e indiretos, tendo também garantido em 2015 uma participação de 22% no PIB (Produto Interno Bruto) da indústria de transformação nacional (ANFAVEA, 2019)

Como delimitação das empresas a serem estudadas, optou-se pelo Cluster Automotivo do Sul Fluminense criado em 2013, mas que teve sua história iniciada em 1996 com a implantação da fábrica da Volkswagen (VW) em Resende, sendo hoje um dos principais polos industriais automotivos do país, contando atualmente com a presença, também em Resende, da Nissan, em Itatiaia da Jaguar Land Rover, Michelin e Hyundai Heavy Industries e em Porto Real da PSA Peugeot Citroën (PAIVA, 2016).

Os especialistas selecionados para realização da pesquisa são funcionários de empresas fornecedoras de peças e conjuntos para as montadoras da indústria automotiva que atuam no Cluster Automotivo Sul Fluminense e que utilizam efetivamente a FMEA no processo produtivo.

Além desta Introdução, este trabalho está estruturado em outros 5 capítulos, a saber: o capítulo 2 aborda a fundamentação teórica sobre a FMEA e o método AHP; o capítulo 3 trata da metodologia adotada na pesquisa, onde são apresentados os parâmetros adotados na revisão bibliográfica e na aplicação do método AHP; o capítulo 4 apresenta os resultados da pesquisa empírica; no capítulo procede-se uma análise e discussão dos resultados e, para finalizar, no capítulo 6 são mostradas as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros, seguidas das referências bibliográficas utilizadas e dos apêndices.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será apresentada a revisão da literatura da pesquisa iniciando com um histórico e os aspectos teóricos relacionados à FMEA, em seguida são mostrados os aspectos positivos atribuídos a esta ferramenta, críticas quanto ao seu uso na forma tradicional e exemplos de novas propostas apresentadas na literatura por especialistas que estudam a sua aplicação prática. A última etapa mostra o Método AHP e suas funcionalidades.

2.1 HISTÓRICO

O surgimento do conceito de qualidade remonta há centenas de décadas mas, para Lins (2000), a preocupação com a qualidade surgiu a partir de 1776 com o desenvolvimento da máquina a vapor, quando o homem começou a substituir a operação manual por outra forma de trabalho, onde se percebe um expressivo aumento na constatação de falhas, acidentes de trabalho e falta de preparação adequada dos operários, o que desencadeou a implantação de supervisão das atividades relacionadas com o ofício e inspeções dos produtos produzidos.

O gerenciamento da qualidade deve incluir, dentre outras ferramentas, a gestão dos riscos operacionais e esta é a função básica da FMEA, identificando os possíveis modos de falha e implementando procedimentos que evitem a sua ocorrência ou mitiguem os seus efeitos.

Johnson e Khan (2003) afirmam que o primeiro relato sobre a FMEA foi registrado na década de 1920 e seu uso passou a ser significativamente documentado a partir do início dos anos 60, quando a Agência Nacional de Aeronáutica (NASA) começou a utilizá-lo buscando aumentar a confiabilidade de seus equipamentos. Eles também destacam que a indústria automotiva passou a usar a FMEA no início da década de 1970, mas acelerou seu uso na década de 1990 quando seus concorrentes do Extremo Oriente chegaram trazendo grandes desafios de qualidade e confiabilidade e, mais tarde, mudanças na lei sobre responsabilidade corporativa obrigaram as empresas a revisarem a segurança do projeto de seus produtos utilizando a metodologia.

2.2 ASPECTOS CONCEITUAIS E TEÓRICOS SOBRE A FMEA

A FMEA é uma técnica de engenharia que tem como principal proposta fornecer informações para a tomada de decisões em gerenciamento de risco sendo amplamente usada nas indústrias (KUTLU; EKMEKCIOGLU, 2012). Ela atua identificando componentes críticos

cujas falhas podem causar prejuízos físicos e financeiros, tornado assim os sistemas produtivos mais seguros e confiáveis (PILLAY; WANG, 2003).

Observa-se na literatura sobre o tema que Prasad (1991) foi um dos primeiros pesquisadores a descrever a FMEA como um grupo sistematizado de atividades destinadas a identificar e avaliar os modos e causas potenciais de falhas associados ao projeto e fabricação de um produto, identificando ações para eliminar ou reduzir as chances de ocorrência destas e criando uma documentação deste processo. O autor também confirma que a primeira a usá-lo formalmente foi a NASA, sendo mais tarde incorporado na indústria automotiva, tornando-se uma ferramenta indispensável na otimização do design de um produto e na sua fabricação sem falhas, e complementa afirmando que a FMEA é uma técnica analítica que busca identificar os possíveis modos de falha do processo, avaliar seus potenciais efeitos, identificar suas possíveis causas e as variáveis de processo que podem ser usadas como controles para prevenção ou detecção das condições de falha, e deve ser um documento dinâmico garantindo que sejam refletidas as últimas modificações nos processos e nos projetos de produtos.

Dale *et al.* (1998) definem a FMEA como uma ferramenta de planejamento de qualidade que tem como proposta identificar, nas etapas de projeto e processo, as possíveis falhas que podem ocorrer durante a fabricação de um produto ou seu uso pelo cliente. Corroborando com Prasad (1991), eles afirmam que a empresa deve considerar a FMEA um documento vivo e que sua atualização deve ser contínua. Ele deve ser aplicado como uma filosofia corporativa em que todos devem estar comprometidos, cabendo aos gestores identificar sua necessidade na empresa e a corporação perceber que ele não deve ser apenas uma tarefa obrigatória, mas sim um modo de vida (PRASAD, 1991).

Para se usar efetivamente a FMEA é necessária uma boa preparação, com muito detalhamento, demandando um tempo relativamente longo. Por conta disso, mesmo tendo uma participação importante no processo, é comum os engenheiros considerarem esta tarefa muito demorada e tediosa (DALE *et al.*, 1998). Para amenizar esta percepção, Prasad (1991) destaca que um mês gasto na elaboração de uma FMEA adequada pode economizar um ano de “combate a incêndios de engenharia”.

Complementando, o Manual de Referência da AIAG (AIAG, 2008) em sua 4ª edição, destaca que a oportunidade é um dos fatores mais importantes para que se tenha uma implementação bem-sucedida de uma FMEA. Ela deve ser feita antes da implementação de um projeto ou um processo pois sempre existe o risco de existir um modo de falha potencial. O tempo inicial gasto corretamente na elaboração de uma FMEA, quando as alterações de produto

ou processo são implementadas de forma mais fácil e a um custo mais baixo, irão eliminar ou minimizar o risco de problemas que podem surgir com uma mudança tardia.

2.3 TIPOS DE FMEA

Prasad (1991) mostra que a FMEA apresenta duas categorias, a *Design FMEA*, que aborda a intenção do projeto levando em consideração os limites técnicos e físicos de um processo, e a *Process FMEA* onde se utiliza o resultado da avaliação dos engenheiros, de acordo com experiências anteriores, na análise de cada item que poderia falhar na realização de um processo. A primeira deve ser aplicada nas fases iniciais do projeto e a segunda antes que os equipamentos e ferramentais de fabricação sejam desenvolvidos e adquiridos (AIAG, 2008).

Com relação às duas categorias Dale *et al.* (1998) destacam que a *Design FMEA* avalia o que pode dar errado quando ocorre uma falha no projeto e a *Process FMEA* avalia as razões de possíveis falhas durante a fabricação quando o produto ou serviço não foi realizado conforme o projeto.

2.3.1 FMEA de Projeto (*Design FMEA*)

De acordo com Teoh e Case (2004) quanto ao desenvolvimento do processo, a *Design FMEA* envolve as etapas de desmembrar o produto em partes identificando os possíveis modos de falha e suas potenciais causas em cada uma destas partes. Em seguida são determinados os controles já existentes para as causas, os efeitos das falhas tanto na montagem do produto quanto nos usuários finais e então procede-se a avaliação dos riscos.

Segundo o Manual de Referência da AIAG (AIAG, 2008), a *Design FMEA* apoia o projeto de um produto na redução de riscos de falhas:

- Realizando uma avaliação objetiva do projeto considerando requisitos funcionais e alternativas de *design*,
- Levando em consideração aspectos relacionados a fabricação, serviço e reciclagem,
- Aumentando a probabilidade de que todos os modos de falha potenciais e seus efeitos sejam considerados,

- Desenvolvendo uma lista classificada dos modos de falha de acordo com seus possíveis efeitos nos clientes estabelecendo uma priorização no desenvolvimento de testes e análises de validação,
- Fornecendo informações sobre lições aprendidas visando colaborar na solução de problemas de campo e possíveis alterações de *design*.

2.3.2 FMEA de Processo (*Process FMEA*)

Já a *Process FMEA* se inicia com um fluxograma do processo mostrando cada etapa de fabricação, em seguida identifica-se os possíveis modos de falha e suas causas potenciais, determina-se os controles existentes, os efeitos das falhas nos operadores de produção e usuários finais do produto e finaliza-se com a avaliação dos riscos destes efeitos (TEOH; CASE, 2004).

Neste caso, o Manual de Referência da AIAG (AIAG, 2008), afirma que a *Process FMEA* apoia o desenvolvimento do processo de fabricação:

- Fazendo a identificação e avaliação de todas as funções e requisitos do processo,
- Identificando e avaliando os potenciais modos de falhas e seus possíveis efeitos no processo e nos clientes,
- Identificando as causas potenciais de falhas e as variáveis do processo que devem ser consideradas nos controles para redução da sua ocorrência ou melhoria na detecção,
- Estabelecendo um sistema de priorização das ações preventivas, corretivas e controles necessários.

2.3.3 As principais diferenças entre os dois tipos de FMEA

A *Design FMEA* deve ser atualizada sempre que ocorrerem alterações ou novas informações surgirem ao longo das fases de desenvolvimento e sua conclusão deve ocorrer antes do lançamento do processo de produção, além disso, deve sempre ser considerada como fonte de lições aprendidas para futuros projetos. Já com relação a *Process FMEA*, ela deve ser realizada antes da definição dos equipamentos e ferramental produtivo e todas as operações devem ser consideradas, principalmente a fabricação de componentes, assim como todos os demais processos que possam afetar aquela operação de fabricação e montagem, como

recebimento, transporte de material, estocagem e identificação dos itens. Além disso, a *Process FMEA* não necessariamente depende de mudanças no design do produto para resolver as limitações no processo, mas deve levar em consideração as características do projeto em relação ao processo de fabricação pois ele foi elaborado buscando garantir que o produto resultante atenda às expectativas dos clientes (AIAG, 2008).

2.4 PROCEDIMENTO PARA ELABORAÇÃO DA FMEA

Franceschini e Galetto (2001) descrevem a FMEA como uma ferramenta de confiabilidade que deve ser aplicada por equipe multifuncional com conhecimento para analisar todo o ciclo de vida do produto e que tenha capacidade de quantificar o potencial de perigo de um modo de falha classificando as prioridades de risco e as ações corretivas necessárias para que ele possa ser eliminado ou mitigado. Dale *et al.* (1998) complementam destacando que a FMEA é uma abordagem por equipe onde é importante reunir a combinação certa de profissionais com conhecimento sobre a tarefa e não deixar de considerar a experiência de fornecedores e clientes, e segundo Teoh e Case (2004) essa equipe deve ser composta por especialistas dos diversos departamentos da empresa.

Para facilitar o entendimento de como se processa uma FMEA, Bevilacqua, Braglia e Gabrielli (2000) descrevem uma sequência bem simplificada de ações:

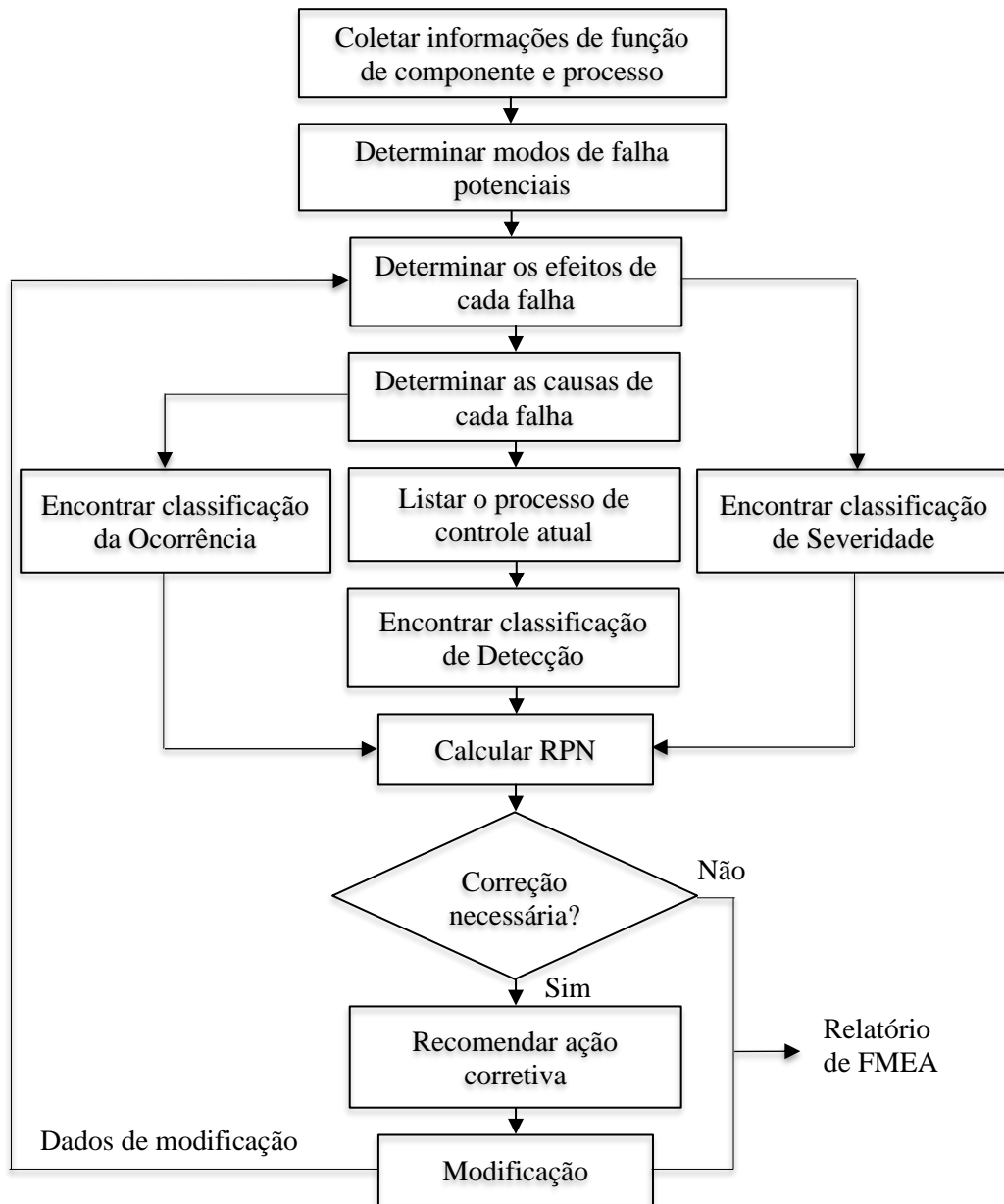
1. Listar os subsistemas e partes do sistema em análise;
2. Listar e descrever os modos de falha para cada parte;
3. Estimar a chance de ocorrência para cada modo de falha, a chance de não detectar as falhas e seu grau de severidade;
4. Calcular o número de criticidade que mede o nível de risco para cada falha ($RPN = S \times O \times D$);
5. Classificar as falhas em relação aos valores obtidos no cálculo do RPN;
6. Tomar medidas sobre os problemas de maior risco;
7. Verificar a eficácia da ação revisando a análise de risco.

Pillay e Wang (2003) apresentam um modelo de procedimento que segue a orientação do Manual de Referência elaborado pelas empresas *Chrysler, Ford e General Motors* para uso de seus fornecedores como um guia para o desenvolvimento de *design e process FMEA*. Este modelo é dividido nas etapas descritas a seguir.

- 1 - Identificar e compreender as etapas do processo e suas funções, requisitos e especificações que estão dentro do escopo da análise
- 2 - Descrever como cada item poderia falhar em atender aos requisitos do processo (Modo de Falha Potencial)
- 4 - Descrever o impacto da falha em termos do que o cliente pode notar ou experimentar. (Efeitos Potenciais da Falha)
- 5 - Avaliar o valor associado ao efeito mais sério para um determinado modo de falha (Severidade)
- 6 - Para cada modo de falha, identificar causas potenciais que fazem com que o item não atinja a função pretendida
- 7 - Avaliar com que frequência uma causa específica é susceptível de acontecer no modo de falha em análise. (Ocorrência)
- 8 - Listar os métodos que são usados para prevenir cada causa da falha
- 9 - Listar os métodos que são usados para detectar a causa ou o modo de falha
- 10 - Classificar a capacidade de detectar uma causa ou um modo de falha resultante (Detecção)
- 11 - Calcular o número de prioridade de risco (RPN) multiplicando as classificações de Severidade, Ocorrência e Detecção.
- 12 - Recomendar esforços adicionais para reduzir o risco, escolhendo a melhor forma de priorizar esses esforços. Priorizando na seguinte ordem: reduzir a Severidade, reduzir a Frequência de Ocorrência e melhorar a Detecção.
- 13 - Verificar o desempenho real após a implementação das ações recomendadas.

Na Figura 1 os autores ilustram as etapas deste modelo.

Figura 1: Procedimento para elaboração da FMEA



Fonte: Pillay e Wang (2003).

De uma forma simplificada Franceschini e Galetto (2001) descrevem que para realizar a FMEA a equipe responsável deve identificar o componente, o modo potencial de falha deste componente, o potencial efeito de falha e seu índice de gravidade (S), a causa potencial do fracasso e a frequência em que ocorre (O), as ações de verificação do projeto e o índice de detectabilidade (D), usando estes 3 dados para calcular o RPN. Em seguida ações preventivas devem ser recomendadas priorizando os modos de falha com maior RPN. Após estas ações serem executadas, a avaliação dos fatores de risco deve ser refeita e o novo RPN calculado. A Figura 2 ilustra um formulário utilizado para elaboração de uma FMEA de processo.

Figura 2: Formulário FMEA de processo

FMEA - ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS													FMEA Nº					
FMEA: PROCESSO			ÁREAS ENVOLVIDAS:					APROVAÇÃO DO CLIENTE:			ETAPA:	PÁGINA:						
PROCESSO/PRODUTO:			CLIENTE/PROJETO:							DATA 1ª EMISSÃO								
RESPONSÁVEL PROJ./MANUF.:			EQUIPE:							DATA REVISÃO:								
Etapa do processo Função	Requisito	Modo de Falha Potencial	Efeitos Potenciais da Falha	SEV	CLASS	Causas Potenciais de falha	OCOR	Controle atual Prevenção	Controle atual Detecção	DET	R.P.N.	Ação Preventiva Recomendada	Responsável e data de conclusão	Resultados da ação				
														Ações Tomadas		SEV	OCOR	DET
Op 70/ Aplicação manual de cera no interior do painel da porta	Cubra a porta interna e superfícies da torre com cera com a espessura especificada	Cobertura insuficiente de cera na superfície	Painéis interiores da porta corroídos	7		Cabeça de pulverização não inserida o suficiente	8	Não existe	Variáveis verificam a espessura do filme	5	280	Adicionar parada de profundidade positiva ao pulverizador	Engenharia de produção 10/2015	Parada do pulverizador é verificada on-line	7	2	5	70
			Permite violação de integridade do painel interno da porta			Cabeça de pulverização entupida Viscosidade muito alta Temperatura muito baixa Pressão muito baixa	5	Testar spray no arranque e após períodos de inatividade. Manutenção preventiva para limpar as cabeças	Variáveis verificam a espessura do filme	5	175	DOE sobre viscosidade vs. temperatura vs. pressão	Engenharia de produção 10/2015	Limites de temperatura e pressão foram determinados, controles de limite instalados Gráficos mostram processo sob controle Cpk = 1,85	7	1	5	35

Fonte: Adaptado de AIAG (2008)

2.5 ASPECTOS POSITIVOS ATRIBUÍDOS À FMEA

Na literatura pesquisada observou-se que muitos autores destacam os aspectos positivos relacionados à prática do uso da FMEA, como por exemplo, que é uma técnica amplamente utilizada como auxílio para gerentes e engenheiros, ainda na fase de projeto, identificando os possíveis modos de falha e propondo ações para sua eliminação ou minimização, podendo ser aplicado até o final da vida útil do processo ou produto (JOHNSON; KHAN, 2003; KESKIN; OZKAN, 2009; LIU *et al.*, 2016b; PRASAD, 1991; ROY; SARKAR; MAHANTY, 2016).

Outros autores classificam a FMEA como uma técnica poderosa utilizada para identificar e eliminar falhas melhorando a confiabilidade e a segurança de sistemas, produtos e serviços (CERTA *et al.*, 2017; CHANG; CHENG, 2011; CHANG; CHANG; LEE, 2014; LIU *et al.*, 2012; LIU; YOU; YOU, 2014; LIU *et al.*, 2015b; LIU *et al.*, 2016a; SHARMA; KUMAR; KUMAR, 2007; ZANG; CHU, 2011; ZHOU; THAI, 2016; WANG; LIU; QUAN, 2016).

A FMEA também foi recomendada como uma técnica de engenharia, usada nas indústrias, que gera informações para a tomada de decisões na gestão de riscos (KUTLU; EKMEKCIOGLU, 2012; SONG *et al.*, 2013; ZHOU; THAI, 2016) sendo amplamente aplicada por pesquisadores e profissionais em diversas áreas (SELIM; YUNUSOGLU; BALAMAN, 2016).

Outra característica destacada na literatura é o fato de a FMEA ser vista como uma ferramenta proativa de avaliação de riscos que mitiga potenciais falhas em produtos, processos ou sistemas antes que ocorram (DAGSUYU *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2015b; REZAEI; SALIMI; YOUSEFI, 2017).

Além disso, a FMEA foi citada como uma das primeiras técnicas estruturadas, sistemáticas e proativas utilizadas para análise de falhas (BOZDAG *et al.*, 2015) e uma das ferramentas mais eficientes na prevenção de problemas e identificação de soluções mais eficazes (GUPTA; MISHRA, 2017).

No Quadro 1 são apresentados os principais aspectos positivos encontrados na literatura pesquisada.

Quadro 1: Aspectos positivos atribuídos à FMEA

(continua)

Aspectos positivos	Autores
Tem sido amplamente utilizado para fins de avaliação e mitigação de riscos durante o projeto detectando e prevenindo falhas precocemente.	Prasad (1991)
Técnica formal utilizada no desenvolvimento eficaz de produtos identificando falhas potenciais e tomando as ações apropriadas nos estágios iniciais do projeto.	Huang, Shi e Mak (2000)
Demonstra ser uma das iniciativas preventivas mais importantes durante o estágio de projeto.	Chin <i>et al.</i> (2009)
Traz excelentes resultados se aplicado ao sistema como um todo identificando e eliminando possíveis modos de falha nas fases iniciais de desenvolvimento.	Altabbakh <i>et al.</i> (2013)
Um método qualitativo utilizado para mitigar riscos ainda na fase de projeto.	Roghanian e Mojibian (2015)
Transforma a fase inicial de projeto em um processo que prevê problemas futuros buscando evitá-los ou mitigá-los, permitindo antecipar e evitar falhas, reduzir custos, encurtar o ciclo de desenvolvimento do produto melhorando a confiabilidade, qualidade e segurança de sistemas, produtos e serviços.	Liu <i>et al.</i> (2016b)
Auxilia os projetistas na eliminação ou redução das chances de falhas ainda na fase de projeto.	Roy, Sarkar e Mahanty (2016)
Tem como objetivo ajudar gerentes e engenheiros a descobrir e priorizar os modos de falha potenciais corrigindo-os tanto na etapa de projeto quanto na de produção.	Keskin e Ozkan (2009)
Técnica de engenharia e gerenciamento muito utilizada para identificar e eliminar falhas nas etapas de projeto, processo e serviço.	Du <i>et al.</i> (2016)
Avalia o potencial de falha do produto/processo e seus efeitos, propondo ações para sua eliminação ou minimização, devendo ser aplicado desde o projeto até o final da vida útil.	Johnson e Khan (2003)

Quadro 1: Aspectos positivos atribuídos à FMEA

(continuação)

Aspectos positivos	Autores
Metodologia bem estabelecida que se propõe a identificar e avaliar falhas potenciais e seus efeitos propondo ações para que elas sejam eliminadas ou reduzidas.	Xu <i>et al.</i> (2002)
Técnica prospectiva poderosa amplamente utilizada para identificar e eliminar falhas melhorando a confiabilidade e a segurança de sistemas complexos com a intenção de fornecer informações para tomar decisões de gerenciamento de risco.	Sharma, Kumar e Kumar (2007); Chang e Cheng (2011); Zang e Chu (2011); Liu <i>et al.</i> (2012); Chang, Chang e Lee (2014); Liu, You e You (2014); Liu <i>et al.</i> (2015b); Zhou e Thai (2016); Liu <i>et al.</i> (2016a); Wang, Liu e Quan (2016); Certa <i>et al.</i> (2017)
Técnica de engenharia muito utilizada que se propõe a identificar e priorizar antecipadamente possíveis modos de falha identificando os riscos a eles associados e buscando a sua eliminação ou minimização.	Liu, Liu e Li (2014)
Método poderoso e documentado que permite aos engenheiros estruturarem e formalizarem as possíveis falhas de um produto/processo, suas causas e efeitos.	Seyed-Hosseini, Safaei e Asgharpour (2006)
Técnica de engenharia, muito usada nas indústrias, que gera informações para a tomada de decisões na gestão de riscos.	Song <i>et al.</i> (2013); Kutlu e Ekmekcioglu (2012); Zhou e Thai (2016)
Método popular para medir preventivamente os riscos extensivamente aplicado em design e processos de fabricação.	Chen e Wu (2013)
Técnica usada para descrever as causas inerentes de eventos que podem levar a uma falha do sistema, determinando suas consequências e criando métodos para minimização de sua ocorrência ou recorrência.	Kengpol e Tuammee (2016)
Técnica de prevenção de falhas usado popularmente durante as últimas décadas.	Selvan <i>et al.</i> (2013)
Método sistemático para identificação dos modos de falha e avaliação dos seus efeitos, amplamente utilizado por corporações, organizações industriais e empresas.	Safari, Faraji e Majidian (2016); Zhou, Tang e Jiang (2016)

Quadro 1: Aspectos positivos atribuídos à FMEA

(conclusão)

Aspectos positivos	Autores
Metodologia eficaz de prevenção de problemas e análise de risco para definir, identificar e eliminar falhas de um sistema, design, processo ou serviço.	Chang, Tay e Lim (2015)
Amplamente aplicado por pesquisadores e profissionais.	Selim, Yunusoglu e Balaman (2016)
Identifica e elimina os possíveis modos de falha de um produto nos estágios de projeto e fabricação, de modo a não entregar o produto com defeitos aos clientes.	Song <i>et al.</i> (2013)
Técnica de engenharia amplamente utilizada para definir, identificar e eliminar possíveis falhas em um sistema, design, processo ou serviço antes que isso atinja o cliente.	Zaman <i>et al.</i> (2014); Liu <i>et al.</i> (2015a)
Ferramenta proativa de avaliação de risco que mitiga potenciais falhas em produtos, processos ou sistemas antes de ocorrerem.	Liu <i>et al.</i> (2015b); Dagsuyu <i>et al.</i> (2016); Rezaee, Salimi e Yousefi (2017)
Ferramenta sistemática baseada no trabalho em equipe, usada para identificar falhas, suas causas e efeitos propondo medidas de controle e prevenção, antes que chegue ao consumidor.	Rezaee, Salimi e Yousefi (2017)
Método importante no projeto e priorização de atividades muito usado no planejamento de manutenção preventiva.	Braaksma, Klingenberg e Veldman (2013)
Uma das ferramentas mais eficientes na prevenção de problemas e identificação de soluções mais eficazes muito usada para direcionar a área de manutenção.	Gupta e Mishra (2017)
Abordagem muito popular que avalia a criticidade dos modos de falha de um sistema correlacionando-os com seus efeitos.	Lolli <i>et al.</i> (2015); Lolli <i>et al.</i> (2016)
Uma das primeiras técnicas estruturadas, sistemáticas e proativas utilizadas para análise de falhas.	Bozdog <i>et al.</i> (2015)

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Da mesma forma, muitos autores destacam a vasta gama de atividades nas quais esta ferramenta tem sido utilizada como mostra o Quadro 2.

Quadro 2: Diferentes áreas de aplicação da FMEA

(continua)

Área de aplicação	Autores
Área de Saúde	Liu <i>et al.</i> (2012); Liu <i>et al.</i> (2015a); Liu <i>et al.</i> (2016a)
Empresa de gerenciamento de navios petroleiros e de pesca	Zhou e Thai (2016); Pillay e Wang (2003); Chin <i>et al.</i> (2009); Certa <i>et al.</i> (2017)
Empresa de alimentos	Selim, Yunusoglu e Balaman (2016)
Fábrica de aço	Vahdani, Salimi e Charkhchian (2015)
Fábrica de componentes eletrônicos	Prasad (1991)
Fábrica de Displays de LCD (<i>Liquid Crystal Display</i>)	Chang e Cheng (2011); Liu <i>et al.</i> (2015a)
Fábrica de máquinas engenharia pesada	Zhang e Chu (2011)
Fábrica de máquinas operatrizes	Zhou, Tang e Jiang (2016)
Fábrica de papel	Sharma, Kumar e Kumar (2007)
Fábrica de pastilhas de memória	Yeh e Chen (2014)
Fábrica de garrafas plásticas	Lolli <i>et al.</i> (2015)
Fundição	Selvan <i>et al.</i> (2013)
Indústria Aeroespacial	Liu, You e You (2014)
Indústria automotiva	Xu <i>et al.</i> (2002); Johnson e Khan (2003); Keskin e Ozkan (2009); Kutlu, e Ekmekcioglu (2012)
Indústria de processamento de rochas	Rezaee, Salimi e Yousefi (2017)
Manutenção de equipamentos	Gupta e Mishra (2017)
Montagem de circuitos impressos	Chen e Wu (2013)
Projeto de equipamentos	Francesquini e Galetto (2001)

Quadro 2: Diferentes áreas de aplicação da FMEA

(conclusão)

Área de aplicação	Autores
Refinaria de Petróleo	Bevilacqua, Braglia e Gabrielli (2000)
Usina de energia Nuclear	Song <i>et al.</i> (2013)
Usina termelétrica	Chemweno <i>et al.</i> (2017)

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

A indústria automotiva ainda aparece com destaque nas pesquisas por ter sido uma das áreas precursoras do uso da FMEA, conforme destacado na introdução deste trabalho.

Ainda como evidência de sua importância, a FMEA é descrita em pelo menos seis padrões internacionais:

- *MIL-STD 1629A (US MILITARY STANDARD 1629A, 1980)*, procedimento para a realização da FMEA criado para uso das forças armadas dos Estados Unidos;
- *AIAG's FMEA 4th Edition (AIAG, 2008)*, manual de referência criado pela *Chrysler LLC, Ford Motor Company e General Motors Corporation* com a proposta de orientar fornecedores no desenvolvimento de FMEA tanto de *Design* como de Processo;
- *IEC 60812 (IEC, 2006)* norma elaborada pela organização internacional de padronização de tecnologias elétricas, eletrônicas e relacionadas, que explica como planejar, executar, documentar e manter uma FMEA;
- *BS EN IEC 60812 (BSI, 2018)* uma versão europeia do *IEC 60812*;
- *SAE-J1739 (SAE, 2002)* documento padrão dedicado a área automotiva, contendo requisitos e recomendações para guiar o usuário na realização da FMEA;
- *IATF 16949 (IATF, 2016)* norma que define os requisitos de um sistema de gerenciamento de qualidade para a indústria automotiva e inclui a aplicação da FMEA.

2.6 CRÍTICAS AO USO DA FMEA NA SUA FORMA TRADICIONAL

A FMEA provou ser uma ferramenta para prevenção de riscos com boa aceitação em sistemas, projetos, processos ou serviços, para evitar que falhas e erros ocorram e cheguem ao cliente (LIU *et al.*, 2013), mas o método convencional de cálculo do Número de Prioridade de Risco (RPN) tem sido criticado na literatura por uma variedade de razões (LIU; LIU; LI., 2014;

LIU *et al.*, 2015a; PILLAY; WANG, 2003; WANG *et al.*, 2009). No Quadro 3 estão descritas as críticas mais recorrentes.

Quadro 3 - Críticas à FMEA na sua forma tradicional

(continua)

Críticas	Autores	Ocorrências
<p>O método de classificação do RPN não leva em consideração a importância relativa entre S, O e D.</p>	<p>Dagsuyu <i>et al.</i> (2016); Liu <i>et al.</i> (2016a); Liu <i>et al.</i> (2016b); Wang, Liu e Quan (2016); Roy, Sarkar e Mahanty (2016); Zhou e Thai (2016); Zhou, Tang e Jiang (2016); Bozdog <i>et al.</i> (2015); Liu <i>et al.</i> (2015b); Mentis e Ozen (2015); Vahdani, Salimi e Charkhchian (2015); Chang, Chang e Lee (2014); Liu, Liu e Li (2014); Song <i>et al.</i> (2014); Zaman <i>et al.</i> (2014); Selvan <i>et al.</i> (2013); Moon <i>et al.</i> (2013); Kutlu e Ekmekcioglu (2012); Chang e Cheng (2011); Zhang e Chu (2011); Chin <i>et al.</i> (2009); Keskin e Ozcan (2009); Sharma, Kumar e Kumar (2007); Seyed-Hosseini, Safaei e Asgharpour (2006); Pillay e Wang (2003)</p>	<p>25</p>
<p>Diferentes combinações de S, O e D podem produzir um valor idêntico de RPN, no entanto, a implicação de risco pode ser totalmente diferente.</p>	<p>Certa <i>et al.</i> (2017); Gupta e Mishra (2017); Dagsuyu <i>et al.</i> (2016); Khorshidi, Gunawan e Ibrahim (2016); Liu <i>et al.</i> (2016b); Roy, Sarkar e Mahanty (2016); Zhou e Thai (2016); Safari, Faraji e Majidian (2016); Bozdog <i>et al.</i> (2015); Liu <i>et al.</i> (2015a); Mentis e Ozen (2015); Vahdani, Salimi e Charkhchian (2015); Liu, Liu e Li (2014); Song <i>et al.</i> (2014); Selvan <i>et al.</i> (2013); Zaman <i>et al.</i> (2014); Moon <i>et al.</i> (2013); Kutlu e Ekmekcioglu (2012); Zhang e Chu (2011); Chin <i>et al.</i> (2009); Keskin e Ozcan (2009); Sharma, Kumar e Kumar (2007); Pillay e Wang (2003)</p>	<p>23</p>
<p>Os três fatores de risco são difíceis de serem avaliados com precisão. Muita informação na FMEA é expressa na forma linguística. A subjetividade inerente aos julgamentos não pode ser adequadamente tratada.</p>	<p>Certa <i>et al.</i> (2017); Liu <i>et al.</i> (2016b); Lolli <i>et al.</i> (2016); Safari, Faraji e Majidian (2016); Roy, Sarkar e Mahanty (2016); Wang, Liu e Quan (2016); Zhou e Thai (2016); Zhou, Tang e Jiang (2016); Liu <i>et al.</i> (2015a); Vahdani, Salimi e Charkhchian (2015); Liu, Liu e Li (2014); Liu, You e You (2014); Song <i>et al.</i> (2014); Zaman <i>et al.</i> (2014); Kutlu e Ekmekcioglu (2012); Zhang e Chu (2011); Chin <i>et al.</i> (2009); Xu <i>et al.</i> (2002)</p>	<p>18</p>

Quadro 3 - Críticas à FMEA na sua forma tradicional

(conclusão)

Críticas	Autores	Ocorrências
A escala RPN não é contínua. Somente 120 dos 1000 números podem ser gerados a partir do produto de S, O e D	Bozdag <i>et al.</i> (2015); Song <i>et al.</i> (2014); Liu, Liu e Li (2014); Selvan <i>et al.</i> (2013); Chang e Cheng (2011); Chin <i>et al.</i> (2009)	6
A RPN considera apenas três fatores de risco, principalmente em termos de segurança, ignorando aspectos econômicos	Certa <i>et al.</i> (2017); Rezaee, Salimi e Yousefi (2017); Chin <i>et al.</i> (2009)	3
A forma matemática adotada para o cálculo da RPN é fortemente sensível às variações nas avaliações dos fatores de risco	Liu <i>et al.</i> (2016a); Liu <i>et al.</i> (2015a)	2

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Importante destacar que 62% das críticas (48 em 77) fazem referência aos valores atribuídos aos fatores de risco Severidade, Ocorrência e Detecção, por não se considerar a importância relativa entre os mesmos e pelo fato do RPN ser calculado pela simples multiplicação destes fatores, gerando valores iguais mas com possibilidade de apresentarem implicações de risco diferentes.

2.7 PROPOSTAS DE CÁLCULO DO RPN ENCONTRADAS NA LITERATURA

Buscando a correção dos problemas indicados nas críticas apontadas pelo uso convencional do cálculo do RPN muitas propostas têm sido apresentadas utilizando diversas técnicas ou métodos alternativos.

Bevilacqua, Braglia e Gabrielli (2000) propuseram um novo RPN, uma função ponderada que considera sete fatores críticos e se desenvolve em 2 etapas. Primeiramente uma comparação paritária entre os fatores é realizada avaliando a ordem de importância relativa entre eles e em seguida usa-se uma simulação de *Monte Carlo* que irá gerar, aleatoriamente, vários conjuntos de pesos. Realizadas estas etapas é feita uma análise estatística para identificar os equipamentos

mais críticos. Baseado nesta classificação de criticidade são então atribuídas as políticas de manutenção dos equipamentos identificando aqueles que prioritariamente devem receber uma maior frequência de controle. Eles escolheram esta abordagem porque ela simplifica o nível de detalhamento de análise que geralmente é muito oneroso e a solução adotada cria um índice de criticidade global que é calculado para a máquina como um todo, considerando cada máquina individualmente. O artigo também apresenta um conjunto de tabelas representando possíveis diretrizes que podem ser usadas na atribuição de pontuação nas avaliações de falhas.

Seyed-Hosseini, Safaei e Asgharpour (2006) utilizaram um modelo chamado DEMATEL (*Decision Making Trial and Evaluation Laboratory*). A informação de falha na FMEA é descrita como um diagrama ponderado, onde os modos ou as causas de falha são indicadas pelos nós e os modos de falha de efeitos pelas conexões direcionadas, onde existem pesos indicando a gravidade dos efeitos de uma alternativa em outra. Um modo de falha é identificado como potencial causa de outros quando apresenta uma relação indireta, aquela que só pode mover-se em um caminho indireto entre duas alternativas. Sendo assim as alternativas que apresentam mais efeito sobre outras são chamadas despachantes e devem ter maior prioridade. Por outro lado, as que recebem mais influência de outras, as receptoras, devem ser consideradas com menor prioridade. Desta forma, a priorização das alternativas será determinada pelo tipo das relações e pela gravidade da influência de cada modo de falha sobre o outro. Eles concluem afirmando que o DEMATEL pode ser muito útil na priorização dos modos de falha nos sistemas que apresentam muitos subsistemas e componentes.

Chin *et al.* (2009) apresentaram uma FMEA para investigação de quatro sistemas diferentes em uma embarcação onde cada um deles é considerado para diferentes modos de falha com potencial de risco de acidentes com consequências graves. Nesta proposta eles utilizaram a abordagem ER (*Evidential Reasoning*) baseada em grupo. Ela considera a avaliação dos fatores de risco usando estruturas de crença, onde as estruturas de crenças individuais são sintetizadas em estruturas de crenças grupais sendo estas agregadas em estruturas de crença globais. Estas estruturas de crença globais são convertidas em pontuações de risco esperadas que são classificadas usando a abordagem MRA (*Minimax Regret Approach*). Os autores apresentam como pontos positivos desta proposta o fato de os pesos de importância relativa dos fatores de risco serem considerados e, quando se utiliza estrutura de crenças, a diversidade e a incerteza das informações obtidas na avaliação dos especialistas podem ser mais bem refletidas e modeladas.

Visando obter um RPN mais preciso, Rezaee, Salimi e Yousefi (2017) recomendaram que a priorização dos modos de falha fosse realizada por uma pontuação derivada de uma

abordagem baseada no custo gerado pelas falhas usando a FMEA-DEA (*Data Envelopment Analysis*). O modelo inicia com a realização de uma FMEA em sua forma tradicional. Em seguida, são calculados os custos relacionados a cada falha no sistema e estas falhas são então priorizadas com uma aplicação da FMEA-DEA, onde os fatores de risco Severidade, Ocorrência e Detecção são considerados entradas e o custo saída indesejável. Com esta proposta eles acreditam que a empresa irá conseguir significativa redução de custos pois a atuação na solução dos modos de falha é realizada priorizando aqueles que geram maior prejuízo financeiro.

Liu *et al.* (2014) empregaram um método baseado na Teoria *Grey*. A proposta sugere um modelo melhorado da GRA (*Grey Relational Analysis*), chamado GRP (*Grey Relational Projection*), para priorização do risco nos modos de falha identificados. Neste novo modelo os números D são utilizados para expressar e modelar os resultados da avaliação dos fatores de risco fornecidos pelos especialistas e a ordem de prioridade de riscos dos modos de falha é determinada pelo novo método GRP. Segundo eles isto permite que se obtenha uma ordem de classificação de risco mais precisa e razoável e que os especialistas atribuam valores mais significativos aos fatores de risco identificados. Os autores afirmam que além de lidar de forma mais eficaz com as diversas incertezas existentes no processo de avaliação de riscos, esta proposta classifica de forma mais abrangente o risco dos modos de falha.

Chen e Wu (2013) apresentaram uma proposta de integração da FMEA com o AHP que utilizou seis critérios e dezessete subcritérios na avaliação dos RPNs em um sistema de avaliação de fornecedores. O processo inicia com a definição de um sistema de pontuação que seleciona os fornecedores, em seguida é realizado o procedimento padrão da FMEA para definição dos valores da Severidade, Detecção e Ocorrência e aplica o AHP para determinar o peso de cada critério tomando como base a sua importância. O RPN é então calculado considerando o peso do critério. Como resultado a empresa pode categorizar seus fornecedores de forma mais eficaz, selecionando parceiros que apresentam baixo risco e ainda fornecer feedback para aqueles que se mostrarem insatisfatórios para que estes possam corrigir suas falhas e voltarem a ser parceiros no futuro.

A maioria das propostas pesquisadas apresentavam o uso da lógica *Fuzzy* combinada com outras técnicas, conforme alguns exemplos que serão mostrados a seguir.

Em um estudo envolvendo valores de RPN iguais que apresentam implicações de risco diferentes, Pillay e Wang (2003) utilizaram uma base de regras *Fuzzy* para fazer a classificação das causas potenciais incluindo em seguida fatores de ponderação para Severidade, Ocorrência e Detecção aplicando termos linguísticos defusificados e Teoria *Grey*. Os diferentes modos de

falha são avaliados para cada um dos sistemas em estudo, considerando os diferentes arranjos de monitoramento de alarmes ou condições que estejam em operação. Eles justificam sua proposta afirmando que ela pode ser usada em sistemas que não tenham dados de segurança disponíveis, ou se eles não forem confiáveis, porque é um método que foi preparado para, em um estudo usando FMEA, combinar experiência com conhecimento especializado. Ao realizar a análise utilizando termos linguísticos, os especialistas podem aprimorar a aplicabilidade da FMEA pois expressam seus julgamentos de forma mais realista.

Sharma, Kumar e Kumar (2008) desenvolveram um estudo que incorporou uma estrutura unificada (qualitativa e quantitativa) baseada nas teorias *Fuzzy* e *Gray* para avaliação do comportamento de falha de um sistema. Na etapa quantitativa, a partir de um modelo equivalente de árvore de falhas é gerado um modelo de rede de *Petri* e as falhas do sistema e os tempos de reparo são calculados com base nas etapas do algoritmo. Na segunda etapa, que tem como proposta melhorar as características de confiabilidade e manutenção, uma análise qualitativa aprofundada é realizada usando FDMS (*Fuzzy Decision Making System*) e GRA (*Grey Relation Analysis*). Os autores defendem que, com as informações obtidas neste modelo, os profissionais de manutenção conseguem entender de uma maneira mais realista a dinâmica comportamental do sistema que operam, e assim prever medidas de manutenção para melhorar o seu desempenho.

Em um estudo aplicado na linha de montagem do amortecedor de veículos automotivos, Keskin e Özkan (2009) aplicaram o algoritmo *Fuzzy ART* (*Adaptive Resonance Theory*) na classificação dos modos de falha considerando suas semelhanças com o auxílio do parâmetro de vigilância. Para cada entrada, são avaliados separadamente os valores da Severidade, Ocorrência e Detecção. Os valores do RPN são então compostos para cada entrada e cada uma delas é apresentada ao sistema com os valores de Severidade, Ocorrência e Detecção. As entradas semelhantes são então agrupadas, considerando os três parâmetros, e a priorização é dada utilizando-se a média aritmética dos valores de entrada em cada classe de falha determinada. Os autores apresentam como principal vantagem deste modelo o fato de o algoritmo proposto determinar as classes e suas associações, sendo então os modos de falha classificados com base na sua similaridade sem atribuição de um limite como acontece na FMEA clássica. Neste caso a quantidade de modos de falha que exigem ação corretiva apresentam uma redução de 46%. Além disso, o método pode ser aplicado em qualquer setor, independentemente de seu tamanho, pois apresenta facilidade de adaptação e verificação da semelhança entre os insumos.

Kutlu e Ekmekçioğlu (2012) utilizaram o *Fuzzy* AHP para determinação do vetor de peso dos fatores de risco, Severidade, Detecção e Ocorrência. Os modos de falha, identificados por um grupo de decisores, são utilizados para a construção de uma matriz de comparação por pares para fatores de risco que, utilizando o *Fuzzy* AHP, determina os vetores de peso desses fatores. Em seguida são agregadas avaliações linguísticas de especialistas para cada modo de falha e seus fatores de risco obtendo-se um valor médio. Usando os vetores de peso e os escores linguísticos dos fatores de risco para cada modo de falha, eles obtêm os escores dos modos de falha utilizando o *Fuzzy* TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*). Estes resultados são então considerados para priorização dos modos de falha. Este modelo, além de permitir que especialistas avaliem os fatores de risco de cada modo de falha potencial em variáveis linguísticas, ele leva em consideração a importância destes fatores.

Liu *et al.* (2012) desenvolveram um estudo onde é utilizado um quadro para a avaliação da FMEA onde estão destacados os principais riscos nos projetos de transferência de localização e terceirização, as causas, efeitos e possíveis ações de prevenção e correção. O estudo foi realizado com a aplicação do método VIKOR (*ViseKriterijumska Optimizacija i Kompromisno Resenje*), visando a otimização multicritérios, onde a proposta é identificar a classificação de prioridade dos modos de falha com base nos fatores de risco. Para avaliar as classificações e pesos da Severidade, Ocorrência e Detecção, utilizaram variáveis linguísticas, expressas em números trapezoidais *Fuzzy*. Eles justificam esta proposta afirmando que o VIKOR determina uma solução de compromisso com grande possibilidade de aceitação pelos tomadores de decisão pois se concentra no ranking e na seleção de um conjunto de alternativas onde existem critérios conflitantes.

Song *et al.* (2013) apresentaram uma proposta para a priorização dos modos de falha, em um sistema de válvulas de vapor, visando orientar a alocação dos recursos de manutenção. Neste estudo eles utilizaram a lógica *Fuzzy* para pontuar os modos de falha e os pesos dos fatores de risco. Em seguida a classificação final de todos os modos de falha foi feita utilizando o coeficiente de proximidade derivado do processo *Fuzzy* TOPSIS ponderado. Segundo os autores, esta abordagem resolve uma questão muito criticada na literatura, a escala de medição ordinal discreta e a multiplicação simples para se chegar ao valor final do RPN. Ela considera tanto os pesos subjetivos quanto os objetivos dos fatores de risco podendo, desta forma, refletir de uma maneira mais completa a sua importância. Como são usados termos linguísticos no lugar de valores numéricos puros, os especialistas conseguem expressar seus julgamentos de forma mais realista ajudando a garantir que os modos de falha não sejam subestimados ou superestimados.

Vahdani, Salimi e Charkhchian (2015) afirmam que a importância relativa entre os fatores de risco Severidade, Detecção e Ocorrência podem ser diferentes uma da outra. Pensando nesta questão eles sugeriram a aplicação do método TOPSIS visando determinar a preferência de alternativas versus critérios de risco. Ao usar termos linguísticos *Fuzzy* na abordagem de crença, obtém-se um valor mais significativo na descrição dos fatores de risco e o julgamento dos decisores são atribuídos com graus de crença através da avaliação destes fatores. Os autores ainda destacam que este método apresenta uma flexibilidade de atribuição de peso a cada fator mais compatível com situações reais de tomada de decisão.

Estudando o sistema de válvula de vapor em uma usina de geração de energia, Liu *et al.* (2016b) empregaram um modelo onde os fatores de risco Severidade, Ocorrência e Detecção e seus respectivos pesos relativos tem todas as suas informações expressas em termos linguísticos, representados por números *Fuzzy*. Buscando a representação ótima das inter-relações, um fator de risco *Fuzzy Digraph* é desenvolvido quando se faz a avaliação dos fatores de risco e sua importância relativa. Para concluir, são formadas matrizes de risco *Fuzzy* para todos os modos de falha identificados e os RPNs calculados para priorização de propostas de ação na solução dos modos de falha com maior índice de risco. Segundo os autores, o modelo proposto, além de resolver problemas críticos apontados no método de cálculo do RPN convencional, proporciona uma avaliação de riscos mais precisa e razoável para a tomada de decisão quanto as ações corretivas.

2.8 O MÉTODO AHP

Nesta seção será mostrado o Método AHP destacando, com base na literatura estudada, a sua importância nos processos de tomada de decisão e principais recomendações quanto aos procedimentos que devem ser seguidos para sua utilização de forma eficaz. Tal revisão da literatura se faz necessária uma vez que o AHP foi utilizado como um dos insumos relacionados às questões metodológicas da pesquisa.

2.8.1 Considerações gerais

Desenvolvido por Saaty na década de 70, o AHP tem sido utilizado de forma rotineira por organizações públicas e privadas, assim como por empresas de consultoria, por possuir uma ampla estrutura para a tomada de decisão multicritério em análises de questões complexas de monitoramento e planejamento (HARKER; VARGAS, 1987).

Saaty (2008) destaca alguns exemplos de aplicação do AHP em processos de tomada de decisão mostrando sua aplicabilidade em diferentes áreas, relacionadas a seguir.

- O estado da Carolina do Norte utilizou no desenvolvimento de critérios de avaliação de fornecedores ajudando os tomadores de decisão a escolherem o de melhor custo benefício.
- Na *Nuclear Regulatory Commission* (NRC) dos EUA, foi usado na alocação de recursos de TI e na redução da quantidade de reuniões necessárias para tomada de decisões.
- O Departamento de Defesa dos EUA utiliza extensivamente na alocação de seus recursos em diversas atividades.
- Em 2001, após um terremoto devastar a cidade turca *Adapazari*, o AHP foi utilizado na determinação do melhor local para realocação de sua população.
- A *Xerox Corporation* utilizou o AHP para tomada de decisão na alocação de cerca de um bilhão de dólares em projetos de pesquisa.
- Em 1987 uma empresa petrolífera utilizou na escolha do melhor tipo de plataforma a ser construída para uso no Atlântico Norte.
- Em 1991 a IBM usou o AHP ao projetar seu computador AS 400 de médio porte, obtendo o prêmio *Malcolm Baldrige* de Excelência.
- Em 1998 foi utilizado pela *British Airways* na escolha do fornecedor de um sistema de entretenimento para toda a sua frota.
- Em 1999, a *Ford Motor Company* utilizou o AHP para estabelecer prioridades quanto aos critérios que poderiam melhorar a satisfação do cliente.
- Nos esportes, foi usado para prever qual time iria para o *Superbowl* em 1995, acertando quem venceria e no *beisebol* na análise de quais jogadores deveriam ser mantidos em um time.
- Além disso, o AHP tem sido utilizado na admissão de estudantes, promoção de militares e decisões de contratação.

Velasquez e Hester (2103) descrevem o AHP como um dos métodos mais populares da decisão multicritério por apresentar como vantagens a facilidade de uso, ser escalável e, devido à sua estrutura hierárquica, permitir ajustes em tamanho acomodando qualquer problema de tomada de decisão.

Ishizaka e Nemery (2013) lembram que as pessoas são constantemente desafiadas a tomar diferentes decisões e Roy (1981) destaca quatro principais tipos de decisão, sendo um deles a priorização do problema, utilizado quando se pretende criar um procedimento de classificação de determinados fatores de acordo com uma ordem de preferência ou prioridade.

O AHP é utilizado na determinação de prioridades utilizando conjuntos de comparações pareadas, tendo como base a capacidade intrínseca que o ser humano tem de estruturar hierarquicamente suas percepções ao realizar a comparação de duas alternativas semelhantes, com referência a um certo critério, julgando o grau de importância de uma sobre a outra (FORMAN; PENIWATI, 1998).

2.8.2 Estruturação do problema

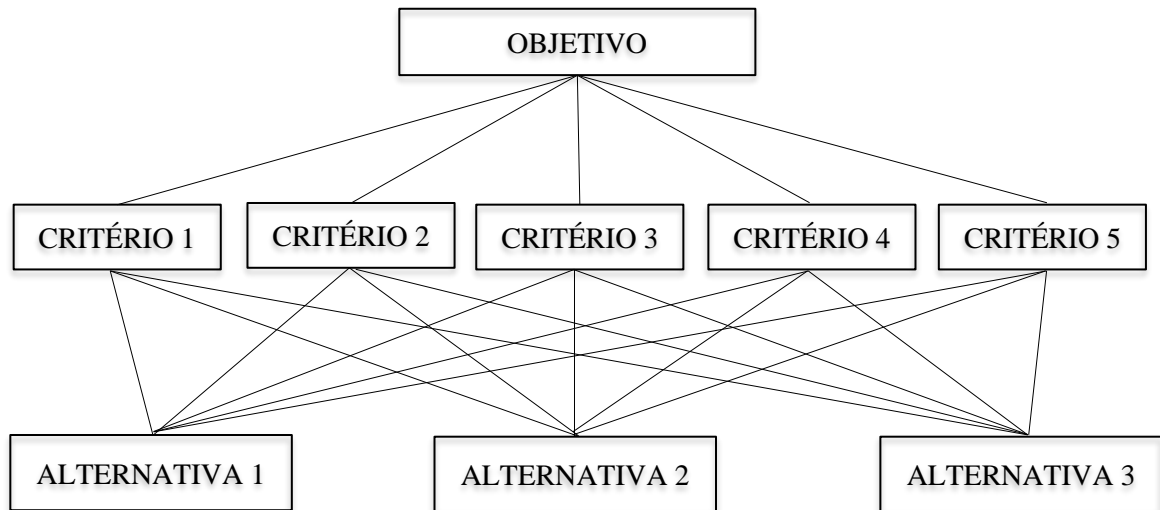
Ishizaka e Nemery (2013) descrevem que a classificação das alternativas no AHP começa com a estruturação do problema e em seguida as prioridades são calculadas com base em comparações por pares, sendo que esta estrutura funciona como uma hierarquia onde o elemento superior representa o objetivo da decisão, o próximo nível os critérios e o nível mais baixo as alternativas.

Saaty (2008) detalha o procedimento afirmando que para se tomar uma decisão com a geração de prioridades de forma organizada o processo deve seguir as seguintes etapas:

- 1- Definir o problema com base no tipo de conhecimento buscado.
- 2- Estruturar a hierarquia tendo no topo o objetivo da decisão, no próximo nível os critérios e no nível mais baixo as alternativas.
- 3- Construir as matrizes de comparação por pares onde cada elemento do nível superior é usado para comparar os elementos do próximo nível em relação a ele.
- 4- Obter a prioridade global das alternativas ponderando as prioridades do nível mais baixo usando como peso as prioridades do nível superior.

Seguindo a orientação de Saaty (2008), após a definição do problema, realiza-se a segunda etapa montando a estrutura da hierarquia que irá orientar a elaboração das matrizes de comparação, como no exemplo mostrado na Figura 3.

Figura 3: Estrutura hierárquica do AHP



Fonte: Ramanathan e Ganesh (1994).

2.8.3 Construção das Matrizes de Comparação

Após organizar hierarquicamente o problema, a próxima etapa é a construção das Matrizes de Comparação como mostrado no exemplo da Tabela 1.

Tabela 1: Matriz de comparação entre Critérios

Critério	C1	C2	C3	C4	C5
C1	w_1/w_1	w_1/w_2	w_1/w_3	w_1/w_4	w_1/w_5
C2	w_2/w_1	w_2/w_2	w_2/w_3	w_2/w_4	w_2/w_5
C3	w_3/w_1	w_3/w_2	w_3/w_3	w_3/w_4	w_3/w_5
C4	w_4/w_1	w_4/w_2	w_4/w_3	w_4/w_4	w_4/w_5
C5	w_5/w_1	w_5/w_2	w_5/w_3	w_5/w_4	w_5/w_5

Fonte: Adaptado de Saaty (1977).

Na matriz da Tabela 1 em cada linha são apontados os pesos comparativos de seu respectivo critério com os outros, alocados nas colunas. Por exemplo, na interseção da linha de C1 com a coluna de C3 entra a comparação do peso de C1 com relação ao de C3 (w_1/w_3).

Nestas Matrizes são realizadas as comparações pareadas, primeiro obtendo o julgamento sobre a importância relativa dos critérios em relação ao objetivo principal e depois das alternativas em relação a cada critério (SAATY, 1990).

Segundo Saaty (2008) para que sejam feitas estas comparações, deve-se usar uma escala indicando quantas vezes um elemento é mais importante do que o outro em relação ao objetivo principal ou ao critério ao qual estão sendo comparados. Essas comparações são realizadas usando uma escala ordinal criada por Saaty (1977) conhecida na literatura por Escala Fundamental de Saaty, mostrada no Quadro 4.

Quadro 4: Escala Fundamental de Saaty

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Importância igual	Os dois elementos contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada	A experiência e o julgamento favorecem um elemento levemente em relação ao outro
5	Importância forte	A experiência e o julgamento favorecem um elemento fortemente em relação a outro
7	Importância demonstrada	Um elemento é fortemente favorecido em relação a outro e pode ser demonstrado na prática
9	Importância absoluta	Um elemento é favorecido em relação a outro com o mais alto grau de certeza

Fonte: Adaptado de Saaty (1977).

Ao fazer as comparações, a pergunta a ser respondida é o quanto o elemento da coluna à esquerda é mais importante do que o elemento da linha mostrada na parte superior, em relação ao objetivo ou critério em questão. O elemento mais importante será sempre apontado com um valor inteiro obtido na Escala Fundamental de Saaty, o menos importante recebe um valor inverso (SAATY, 1990), e todos devem ser positivos, sendo que as comparações da diagonal principal terão valor igual a 1, pois cada elemento está sendo comparado com ele mesmo (ISHIZAKA; NEMERY, 2013).

Como a matriz será sempre recíproca, porque os pesos no triângulo abaixo da diagonal principal serão o inverso dos estabelecidos no triângulo acima da diagonal, apenas a metade superior das comparações será necessária. A metade inferior deve ser programada para ser calculada automaticamente com base nos pesos da metade superior (ISHIZAKA; NEMERY, 2013). A Tabela 2 mostra um exemplo com os pesos já preenchidos.

Tabela 2: Matriz de comparação entre Critérios preenchida

Critério	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	7	9	5	1
C2	1/7	1	3	1/5	1/9
C3	1/9	1/3	1	1/5	1/7
C4	1/5	5	5	1	1/5
C5	1	9	7	5	1

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Considerando o fato de ser utilizada uma matriz recíproca, Saaty (2008, pg. 95) explica que:

A propriedade recíproca desempenha um papel importante na combinação dos julgamentos de vários indivíduos para obter um único julgamento para o grupo. Os julgamentos devem ser combinados de modo que o recíproco dos julgamentos sintetizados seja igual às sínteses dos recíprocos desses julgamentos.

Em seguida o autor afirma que foi provado ser a média geométrica a única forma de se obter estes resultados.

Sendo assim, após a matriz ser preenchida com os pesos comparativos entre todos os critérios, é feito o cálculo do autovetor de cada critério utilizando a média geométrica de sua respectiva linha.

Em seguida, a Prioridade Relativa (w) de cada critério é obtida normalizando os valores dos autovetores, dividindo o valor de cada um pelo resultado do somatório total (WIND; SAATY, 1980; HARKER; VARGAS, 1987; SAATY, 1990).

2.8.4 Teste de Consistência

Harker e Vargas (1987, p. 1384) destacam que “o AHP contém uma medida intrínseca de inconsistência para cada matriz e para toda a hierarquia”. Saaty (1991) também afirma que para se desenvolver uma estrutura robusta, é necessário admitir a existência de alguma inconsistência porque ao assumir que todo o conhecimento é consistente contradiz a experiência que exige ajuste contínuo na compreensão.

Ishizaka e Nemery (2013) recomendam que após conclusão da matriz, deve ser realizada uma verificação da consistência visando detectar possíveis contradições nos valores de peso

atribuídos pelos especialistas, pois faz-se necessário considerar que quando várias comparações em pares são consideradas de forma sucessiva, estas podem se contradizer. Os autores ainda justificam que as prioridades só irão fazer sentido se forem derivadas de matrizes consistentes, ou com baixa inconsistência.

O próximo passo então é a verificação ou o teste de consistência que pode ser determinado seguindo os passos apresentados por Shimizu (2006), como mostrado a seguir:

- I) Montar uma matriz para cálculo do Vetor Peso.
- II) Calcular o Vetor de Consistência.
- III) Calcular o Autovalor Máximo dos julgamentos paritários (λ_{\max}).
- IV) Calcular o Índice de Consistência (CI) utilizando-se a Fórmula (1), onde n é a quantidade de elementos da matriz.

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

- V) Calcular a Taxa de Consistência (CR) aplicando a Fórmula (2).

$$CR = CI / RI \quad (2)$$

Onde RI é o Índice de Consistência Aleatória, desenvolvido por Saaty (1991), sendo que os valores variam de acordo com a quantidade (n) de elementos da matriz de decisão. A Tabela 3 mostra os valores correspondentes para matrizes com até 10 elementos.

Tabela 3: Índice de Consistência Aleatória (RI)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Saaty (1991).

No caso de o CR não apresentar valor inferior a 0,10, é recomendado que os motivos sejam investigados e os especialistas convidados a revisarem as suas respostas (HARKER; VARGAS, 1987; SAATY, 1991; FORMAN; PENIWATI, 1998).

Forman e Peniwati (1998) afirmam também que se pode fazer a exclusão de algum especialista da média geométrica final se seu julgamento apresentar inconsistência muito alta.

Considerando que na interseção da linha de C_i com a coluna de C_j , aqui chamada de célula a_{ij} , aparece a comparação do peso de C_i com relação ao peso de C_j e, reciprocamente, na interseção da linha de C_j com a coluna de C_i aparece a comparação do peso de C_j com relação ao de C_i (célula a_{ji}), a inconsistência em uma matriz pode ocorrer quando, por exemplo, o especialista inverte, pontuando na célula a_{ij} , o C_i como mais relevante do que C_j , sendo este mais importante. Um exemplo é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4: Matriz de comparação com valor inconsistente

Critérios	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	9	9	9	1
C2	1/9	1	3	1	9
C3	1/9	1/3	1	1/5	1/9
C4	1/9	1	5	1	1/9
C5	1	1/9	9	9	1

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Na comparação de C_2 com C_5 (célula a_{25}), destacada na matriz, foi atribuído o peso 9 que deveria ser o valor da comparação de C_5 com C_2 (célula a_{52}). Este julgamento resultou em um valor de inconsistência de 0,67 para a Matriz de Comparação. Ao inverter os pesos fazendo $a_{25} = 1/9$ e $a_{52} = 9$, a inconsistência cai para um valor aceitável de 0,07.

Para identificar o ponto onde o valor do peso provocou a inconsistência, pode ser construída uma matriz, denominada Matriz de Perturbações (\mathcal{E}), que deve apresentar valores próximos de 1. A posição na Matriz que apresentar o maior valor acima de 1, indica o elemento que tem alguma perturbação. Neste caso, o especialista deve ser convidado a reavaliar seu julgamento no ponto indicado (SAATY, 2003). Essa Matriz é montada com os valores obtidos pela Fórmula (3).

$$\mathcal{E}_{ij} = a_{ij} (w_j/w_i) \quad (3)$$

Onde:

\mathcal{E}_{ij} => valor da perturbação na célula w_{ij} da matriz.

a_{ij} => Valor do peso atribuído na célula a_{ij} da matriz de comparação.

w_j => Valor da Prioridade Relativa do elemento j , obtido pela matriz de comparação.

w_i => Valor da Prioridade Relativa do elemento i , obtido pela matriz de comparação.

A Matriz de Perturbações do exemplo apresentado na Tabela 4 é mostrado na Tabela 5.

Tabela 5: Matriz de Perturbações

Critério	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	3,00	0,58	1,38	0,42
C2	0,33	1	0,58	0,46	11,21
C3	1,72	1,72	1	0,47	0,71
C4	0,72	2,17	2,11	1	0,30
C5	2,41	0,09	1,40	3,32	1

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

O valor da perturbação que mais se afasta de 1 é o que aparece na posição a_{25} com 11,21, destacado na matriz, indicando que este é o ponto onde o especialista deve rever seu julgamento.

2.8.5 Cálculo da Prioridade Global

Após validação dos julgamentos de todos os especialistas, o passo final é obter o resultado consolidado das suas respostas. Esta etapa tem a proposta de determinar as prioridades globais, classificando as alternativas em relação aos critérios e, como consequência, ao objetivo principal (ISHIZAKA; NEMERY 2013). Saaty (2008) chama esse processo de síntese e afirma que deve ser realizado utilizando a média geométrica.

Primeiro deve-se calcular a média geométrica das Prioridades Relativas dos critérios, resultante dos julgamentos dos especialistas, cujo resultado é chamado de Prioridade Local. Em seguida, repete-se este cálculo para as alternativas, obtendo-se as Prioridades Locais destas para cada um dos critérios (SAATY, 2008). Para finalizar, as prioridades locais dos critérios e das alternativas são incluídas em uma matriz que realiza a multiplicação de cada elemento da linha da alternativa pela Prioridade Local do critério de sua respectiva coluna. O somatório dos resultados de cada linha indica a Prioridade Global da alternativa correspondente (SAATY, 1990)

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

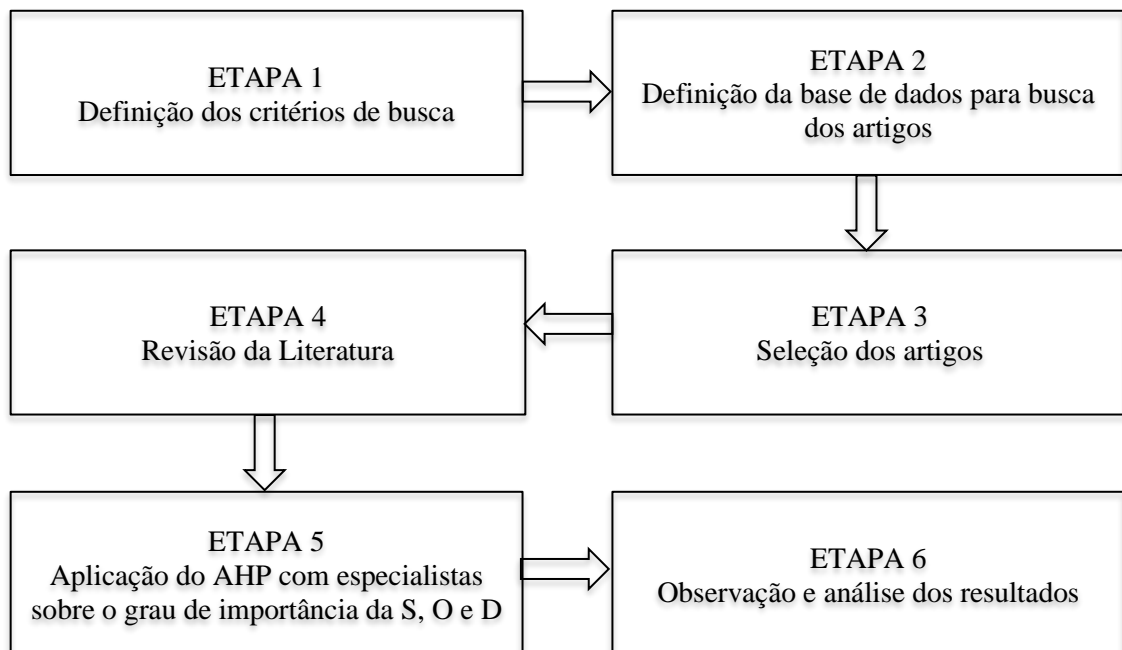
No presente capítulo são apresentados os métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho a fim de alcançar os objetivos pré-estabelecidos, bem como apresentar o tipo de pesquisa e os métodos que foram utilizados para se realizar os objetivos específicos, tendo como meta principal garantir que o objetivo geral seja atingido.

3.1 CLASSIFICAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA

Sob o ponto de vista de sua natureza, esta pesquisa é classificada como aplicada, pois tem a proposta de gerar conhecimento para a aplicação prática na solução de um problema (PRODANOV; FREITAS, 2009) neste caso, indicado por pesquisadores sobre a fragilidade do cálculo do RPN quando realizado em sua forma tradicional.

Para que os objetivos apresentados no capítulo 1 fossem alcançados, a presente pesquisa foi planejada para ser desenvolvida em 6 etapas, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4: Etapas da Pesquisa



Fonte: Produção do próprio autor (2019).

3.2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

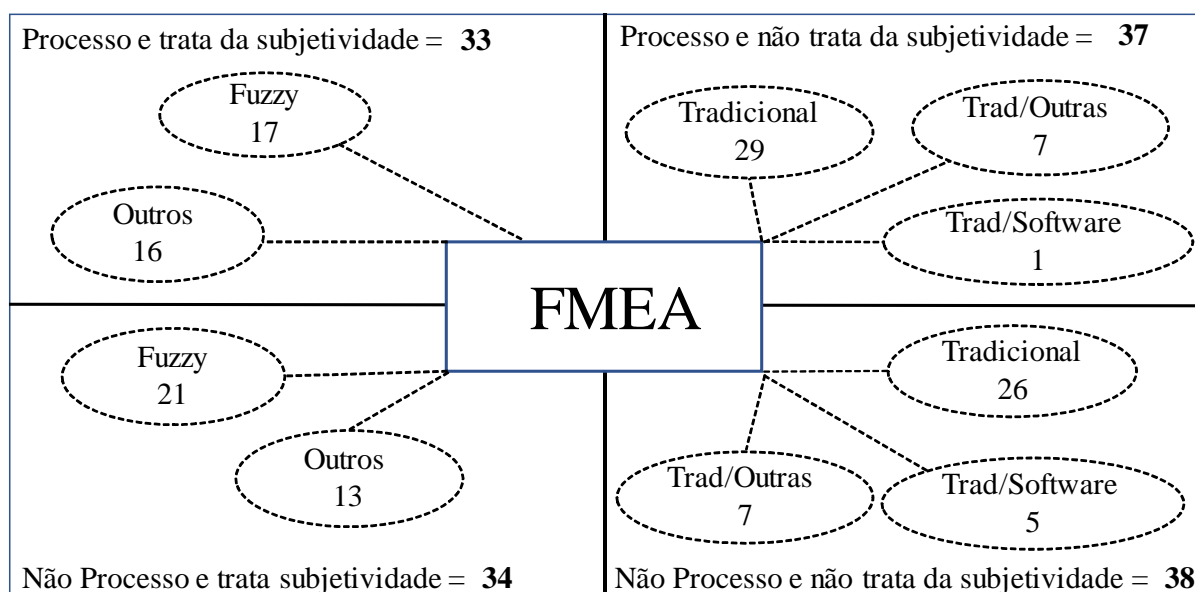
As Etapas 1, 2, 3 e 4 compõem uma proposta que é classificada como uma pesquisa exploratória pois, tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito (GIL, 2002). Uma revisão sistemática da literatura foi realizada utilizando a base de dados do *Web of Science* (WOS).

A escolha desta base encontra-se apoiada em Zhou *et al.* (2018) que afirmam ser o WOS o principal banco de dados de citações do mundo, tendo cobertura multidisciplinar de periódicos de alto impacto em ciências e ciências sociais. Abrizah *et al.* (2013), Chadegani *et al.* (2013), Mongeon e Paul-Hus (2016), também consideram que WOS e *Scopus* são os bancos de dados mais utilizados nos trabalhos de pesquisa bibliográfica e nas análises bibliométricas.

Escolhida a base, foi determinado que o filtro seria pelo campo “tópico” pois assim, ela realiza a busca por documentos que contenham o termo estabelecido em seu título, resumo ou palavras-chave. Além disso foi definido filtrar pelo idioma “inglês”, tipo de documento “artigo” e quanto ao período “todos os anos”, resultando em um total de 142 artigos.

Como na delimitação foi estabelecido que seriam utilizados na pesquisa apenas artigos que abordassem a aplicação da FMEA de processo e tratassem da subjetividade do cálculo do RPN, após uma leitura transversal de todos foi feito um agrupamento. Na Figura 5, são mostrados os quatro grupos diferentes de tratamento identificados.

Figura 5: Agrupamento dos artigos pesquisados



Fonte: Produção do próprio autor (2019).

No canto superior esquerdo da Figura 5, o primeiro grupo mostra que foram 33 os artigos que apresentaram estudo utilizando FMEA de processo e questionam a subjetividade do RPN, sendo assim os escolhidos para serem analisados com detalhe na elaboração do estudo. Uma observação interessante é que a técnica mais utilizada pelos autores em suas propostas foi o modelo *Fuzzy* que aparece em 17 dos 33 artigos.

O segundo grupo, no canto superior direito da Figura 5, apresenta os artigos que estudaram FMEA de processo, mas não trataram da subjetividade do RPN. Destes, 29 discutiam o uso da FMEA em sua forma tradicional, 7 utilizaram outras ferramentas em conjunto e 1 apresentava um software para sua aplicação.

O terceiro grupo, no canto inferior esquerdo da Figura 5, trata de artigos que estudaram FMEA de *design*. Cabe destacar que aqui também predominou a aplicação do modelo *Fuzzy* com 21 dos 34 artigos.

O último grupo também mostra artigos que trataram apenas da FMEA aplicada em sua forma tradicional, e de forma similar ao segundo grupo, em 7 deles utilizaram outras ferramentas de apoio e 5 apresentaram um modelo de *software* para apoiar a aplicação da análise.

3.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP

Na Etapa 5, foi utilizado o AHP, escolhido por ser um método de decisão multicritério utilizado para solução de problemas complexos podendo ser aplicado nos mais diversos tipos de casos, sendo um deles a determinação de prioridades (SAATY, 2000).

O AHP auxilia os envolvidos na avaliação de soluções alternativas, propondo aquelas que sejam mais adequadas para o objetivo principal elucidando o tipo de problema. Cria um quadro abrangente e racional para a possível solução de um problema e sua tomada de decisão, comparando e quantificando seus elementos para hierarquizar soluções alternativas.

3.3.1 Empresas selecionadas para a pesquisa de campo

Para garantir um resultado robusto na pesquisa decidiu-se buscar empresas que atuam no Cluster Automotivo Sul Fluminense onde estão localizadas as mais importantes fábricas de grande porte que atuam no Brasil como a Peugeot, Citroen, Nissan, Land Rover, Jaguar, Volkswagen e Hyundai.

3.3.2 Seleção dos especialistas entrevistados

Foram selecionados 16 especialistas de 4 empresas do Cluster Automotivo Sul Fluminense. Todos os entrevistados são funcionários de empresas fornecedoras de peças e conjuntos para as montadoras da indústria automotiva, que aplicam efetivamente a FMEA nos processos produtivos.

Na Tabela 6 está representado o quantitativo de funcionários de cada uma das 4 empresas mostrando o total de funcionários, quantos atuam diretamente na área operacional, quantos fazem parte da equipe de Gestão de Riscos, e destes quantos aplicam efetivamente a FMEA.

Tabela 6: Análise de Especialistas que trabalham com FMEA

Empresa	Total	Área Operacional	Gestão de Riscos	Aplicam a FMEA
Empresa 1	581	359	15	9
Empresa 2	200	118	14	3
Empresa 3	178	156	7	3
Empresa 4	84	51	3	1

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Cabe destacar que o percentual de funcionários que aplicam a FMEA nas empresas ainda é muito pequeno, uma média de 2,2% dos profissionais que atuam na área operacional. Por outro lado, esta constatação indica que os especialistas entrevistados possuem um nível de conhecimento e experiência significativos na aplicação da ferramenta, o que ajuda muito na robustez dos resultados obtidos.

A Tabela 7, por sua vez, representa as respectivas áreas de atuação e funções atualmente exercidas pelos especialistas que participaram da pesquisa.

Tabela 7: Área de atuação e função atual dos Especialistas

Especialista	Área de atuação	Função atual
E1	Qualidade	Supervisor
E2	Engenharia	Supervisor
E3	Qualidade	Supervisor
E4	Engenharia	Analista
E5	Engenharia	Engenheiro
E6	Qualidade	Engenheiro
E7	Engenharia	Engenheiro
E8	Engenharia	Analista
E9	Engenharia	Analista
E10	Engenharia	Analista
E11	Qualidade	Especialista
E12	Qualidade	Engenheiro
E13	Manufatura	Analista
E14	Manufatura	Coordenador
E15	Logística	Analista
E16	Engenharia	Analista

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Pode-se observar na Tabela 7 que a maioria dos especialistas que são responsáveis pela aplicação da FMEA atuam nas áreas de Qualidade (30%) e Engenharia (50%)

A Tabela 8 apresenta informações sobre o tempo de experiência dos especialistas nas áreas industrial e automotiva assim como na prática da aplicação da FMEA.

Tabela 8: Tempo de experiência dos Especialistas

Período em anos	Quantidade de Especialistas		
	Área Industrial	Área Automotiva	Prática com FMEA
Entre 1 e 3	4	3	4
Entre 3 e 5 anos	0	0	4
Entre 5 e 10	3	3	4
Mais de 10	9	10	4

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

A Tabela 8 evidencia que, 81% dos entrevistados trabalham a mais de 3 anos na área automotiva e 75% deles possuem experiência maior que 3 anos na área Industrial e na prática efetiva do uso da FMEA.

3.3.3 Definição do problema e estruturação da hierarquia

O método foi desenvolvido seguindo o procedimento recomendado por Saaty (2008), onde, na etapa inicial, o problema foi definido como a classificação do grau de importância de cada um dos fatores de risco, Severidade, Ocorrência e Detecção, a ser decidido tomando como base a opinião de especialistas que conhecem e utilizam regularmente a FMEA.

Para a segunda etapa, a estruturação da hierarquia, o primeiro passo foi a definição do “Objetivo Principal”.

Como abordado no capítulo 2, a FMEA é reconhecida mundialmente como uma ferramenta indispensável para a detecção de falhas, atuando de forma proativa e evitando suas ocorrências, mas, apesar de sua relevância, vários pesquisadores apontam problemas na aplicação do cálculo do RPN na sua forma original. Observou-se na literatura que 62% das críticas fazem referência aos valores atribuídos aos fatores de risco, Severidade, Ocorrência e Detecção, por não se considerar a importância relativa entre os mesmos e pelo fato de o RPN ser calculado pela simples multiplicação destes fatores, gerando valores iguais, mas com possibilidade de apresentarem implicações de risco diferentes. Sendo assim, o objetivo principal do questionário foi determinar qual dos 3 fatores de risco, Severidade, Ocorrência e Detecção é mais importante na avaliação de riscos em processos produtivos quando a FMEA é utilizada.

Para a definição dos critérios foram utilizadas como base as definições dos possíveis efeitos de um modo de falha descritas no Manual de Referência criado pela *Chrysler LLC, Ford Motor Company e General Motors Corporation (AIAG, 2008)*.

Para facilitar a montagem das Matrizes de Decisão, os 5 critérios foram codificados como C1, C2, C3, C4 e C5 e o Quadro 5 apresenta as definições de cada um deles.

Quadro 5: Definição dos critérios usados no questionário

(continua)

Código	Definição
C1	A falha ocorrendo externamente a empresa, com o veículo em uso pelo consumidor final, irá causar a perda de controle do mesmo pelo motorista com possibilidade de provocar danos físicos e/ou materiais.
C2	A falha ocorrendo externamente a empresa, com o veículo em uso pelo consumidor final, irá provocar a interrupção de seu funcionamento demandando serviços de manutenção e/ou seguro.

Quadro 5: Definição dos critérios usados no questionário

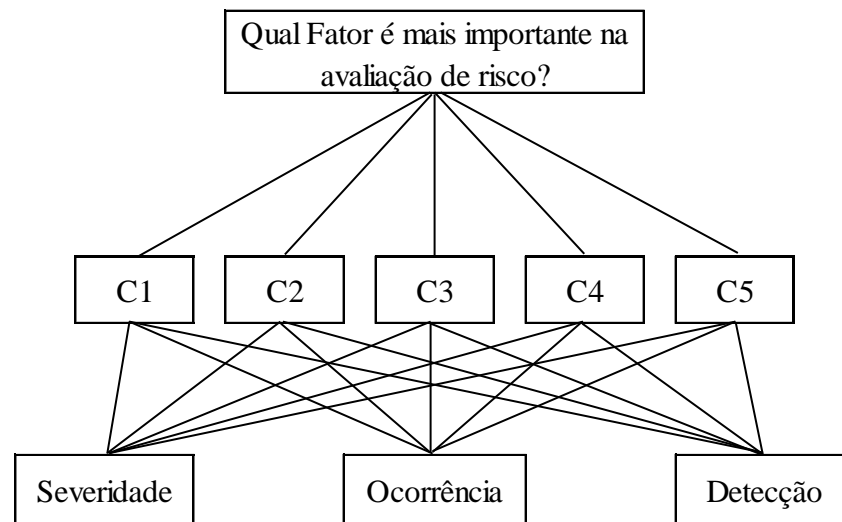
(conclusão)

Código	Definição
C3	A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, interromperá a operação atrasando entregas, mas não gerará danos em peças e/ou equipamentos produtivos.
C4	A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, irá provocar danos em peças e/ou equipamentos produtivos e interromperá a operação atrasando entregas.
C5	A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, irá provocar acidentes com danos físicos ao operador de produção.

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Após definidos o objetivo principal e os critérios, a estrutura da hierarquia já poderia ser criada levando em consideração que, para atingir o objetivo estabelecido, as alternativas deveriam ser os 3 fatores de risco, Severidade, Ocorrência e Detecção. Na Figura 6 está representada a estrutura hierárquica final do AHP utilizada na pesquisa em questão.

Figura 6: Estrutura hierárquica usada na pesquisa



Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Como pode ser observado na Figura 6, no nível superior foi gerada uma Matriz 5 x 5, já que existem 5 critérios sendo comparados par a par com relação a sua importância relativa em relação ao objetivo principal e, no nível inferior, foram geradas cinco matrizes 3 x 3 de julgamentos, pois no segundo nível existem 5 critérios e no terceiro nível 3 alternativas que foram comparadas par a par em relação a cada um deles.

3.3.4 Construção das Matrizes de Comparação

O Excel foi utilizado para a construção das Matrizes onde os valores da diagonal principal já foram estabelecidos em “1”, pelo fato de o elemento estar sendo comparado com ele próprio, e nas células do triângulo abaixo da diagonal foram criadas fórmulas para o cálculo do valor inverso ao da célula correspondente no triângulo acima desta. Além disso, à direita da Matriz foram construídas 2 colunas, uma para cálculo do Autovetor e a outra para cálculo das Prioridades Relativas. A Tabela 9 mostra como ficou a Matriz.

Tabela 9: Matriz de comparação montada para preenchimento

Critério	C1	C2	C3	C4	C5	Autovetor	Prioridade Relativa (w)
C1	1					MG C1	Autovetor/ Σ
C2	1/(w1/w2)	1				MG C2	Autovetor/ Σ
C3	1/(w1/w3)	1/(w2/w3)	1			MG C3	Autovetor/ Σ
C4	1/(w1/w4)	1/(w2/w4)	1/(w3/w4)	1		MG C4	Autovetor/ Σ
C5	1/(w1/w5)	1/(w2/w5)	1/(w3/w5)	1/(w4/w5)	1	MG C5	Autovetor/ Σ

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Conforme explicado na subseção 2.8.3, o Autovetor é resultado da média geométrica dos valores de cada linha e a Prioridade Relativa normalizando os valores dos autovetores, dividindo o valor de cada um pelo resultado do somatório total.

Após realização das entrevistas onde os especialistas responderam aos questionários, apenas os pesos do triângulo superior eram preenchidos, facilitando o processo.

3.3.5 Elaboração dos questionários

Os questionários também foram elaborados no Excel, contendo 3 abas. Na primeira constava uma explicação sobre a proposta da pesquisa e seu caráter sigiloso, além das seguintes informações sobre o respondente:

- Área de atuação na empresa
- Função atualmente exercida
- Tempo de experiência na indústria

- Tempo de atuação na área automotiva
- Tempo de prática com o uso da FMEA

A segunda aba foi dedicada ao questionário dos critérios. Iniciava com uma contextualização sobre a FMEA e o fato de a importância relativa entre os 3 fatores de risco não ser considerada no cálculo do RPN, apresentava o objetivo do questionário e instruções quanto ao seu preenchimento.

A terceira aba continha o questionário das alternativas, iniciando com um resumo do significado de cada Fator de Risco, em seguida uma apresentação sobre o objetivo do questionário e instruções quanto ao seu preenchimento. As 3 abas estão disponíveis nos Apêndices A, B e C.

Para validação dos questionários foi realizado um teste piloto com 3 professores da faculdade onde o pesquisador leciona e um funcionário de uma das empresas fornecedoras de peças do Cluster Automotivo Sul Fluminense. Todos conhecem a FMEA e já fizeram uso dela de forma efetiva. A contribuição deles foi importante, principalmente na elaboração do texto final dos critérios. Foi feita uma primeira rodada onde apresentaram suas críticas ao texto e, após serem realizadas as alterações propostas, uma segunda rodada serviu de base para a validação final onde as respostas apresentaram algumas inconsistências e todas foram corrigidas com pequenos ajustes após discussão presencial onde era mostrada a Matriz de Perturbação dos resultados indicando onde ocorreram.

3.3.6 Aplicação do questionário AHP

O preenchimento dos questionários foi feito na presença do pesquisador pois ele teve acesso às instalações das empresas. Após responderem foram feitos os registros das respostas na Matriz de Comparação e verificada sua consistência. Aqueles que apresentavam resultados inconsistentes eram chamados e, utilizando a Matriz de Perturbação dos resultados, era mostrado onde ocorreram as inconsistências e solicitado uma reavaliação de seus julgamentos. Nas páginas 60 e 64 são mostrados os valores de ocorrência das inconsistências.

Após validação das Matrizes de Comparação foram calculadas as Prioridades Locais dos critérios e das alternativas para obtenção das Prioridades Globais, finalizando o processo de aplicação do AHP.

4 RESULTADOS DA PESQUISA EMPÍRICA

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na aplicação do método AHP, que teve como proposta atender ao terceiro objetivo específico.

4.1 DETERMINAÇÃO DAS PRIORIDADES RELATIVAS PARA OS CRITÉRIOS

Com os critérios definidos e os questionários preparados e respondidos pelos especialistas, foi então elaborada a matriz de comparação paritária para os critérios. Nesta etapa, utilizando a experiência dos especialistas entrevistados, foram atribuídos pesos para cada critério em relação a todos os demais levando-se em consideração o impacto destes no objetivo principal. Conforme indicado na subseção 2.8.3, os pesos foram atribuídos utilizando como base os valores da Escala Fundamental de Saaty (1977), apresentado no Quadro 4.

A Tabela 10 mostra a matriz de comparação paritária dos critérios com as respostas de um dos especialistas. No Apêndice D são apresentadas as matrizes de todos os especialistas.

Tabela 10: Matriz de comparação paritária dos critérios

Critério	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	9	7	7	1
C2	1/9	1	1/3	1/3	1/9
C3	1/7	3	1	1/3	1/9
C4	1/7	3	3	1	1/9
C5	1	9	9	9	1

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Conforme descrito na subseção 2.8.3, os pesos comparativos foram indicados no triângulo localizado acima da diagonal principal, sendo atribuídos, automaticamente pelo Excel, seus valores inversos no triângulo abaixo da diagonal. Por exemplo, destacado na Tabela 10, como na comparação de C1 com C3 foi atribuído um peso de valor 7, na comparação de C3 com C1 o peso aparece como seu inverso, 1/7.

Elaborada a matriz com os pesos, o próximo passo foi determinar o Autovetor que, conforme já explicado, é obtido calculando-se a média geométrica dos valores da linha para cada um dos critérios. A Tabela 11 apresenta os valores do Autovetor obtidos para o especialista utilizado neste exemplo.

Tabela 11: Resultado do cálculo do Autovetor

Critério	C1	C2	C3	C4	C5	Autovetor
C1	1	9	7	7	1	3,38
C2	1/9	1	1/3	1/3	1/9	0,27
C3	1/7	3	1	1/3	1/9	0,44
C4	1/7	3	3	1	1/9	0,68
C5	1	9	9	9	1	3,74
Σ	2,40	25,00	20,33	17,67	2,33	8,50

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Em seguida procedeu-se a normalização destes valores, dividindo o resultado do Autovetor de cada critério pelo somatório de todos os Autovetores chegando-se então aos valores das Prioridades Relativas. Os resultados desta etapa são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12: Resultado do cálculo da Prioridade Relativa

Critério	C1	C2	C3	C4	C5	Autovetor	Prioridade Relativa (w)
C1	1	9	7	7	1	3,38	0,398
C2	1/9	1	1/3	1/3	1/9	0,27	0,031
C3	1/7	3	1	1/3	1/9	0,44	0,051
C4	1/7	3	3	1	1/9	0,68	0,080
C5	1	9	9	9	1	3,74	0,440
Σ	2,40	25,00	20,33	17,67	2,33	8,50	1,00

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Os resultados mostrados na Tabela 12 confirmam a superioridade do critério C5 sobre os outros quatro critérios na avaliação deste especialista, com um valor de 0,440.

Todas as 16 matrizes foram submetidas ao Teste de verificação da Consistência que, conforme mostrado na subseção 2.8.4, inicia com a montagem de uma matriz para cálculo do Vetor Peso onde cada elemento da matriz de comparação paritária dos critérios foi multiplicado pela Prioridade Relativa (Tabela 12) do critério de sua coluna.

Fazendo-se o somatório de cada linha desta matriz foram obtidos os valores do Vetor Peso para cada critério.

A matriz com os resultados do Vetor Peso para o especialista do exemplo em demonstração está representada na Tabela 13.

Tabela 13: Resultado do cálculo do Vetor Peso

Critério	C1	C2	C3	C4	C5	Vetor Peso
C1	0,40	0,28	0,36	0,56	0,44	2,041
C2	0,04	0,03	0,02	0,03	0,05	0,166
C3	0,06	0,09	0,05	0,03	0,05	0,276
C4	0,06	0,09	0,15	0,08	0,05	0,435
C5	0,40	0,28	0,46	0,72	0,44	2,301

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Dividindo cada Vetor Peso (Tabela 13) pela respectiva Prioridade Relativa (Tabela 12), chegou-se aos valores dos Vetores de Consistência, como mostra a Tabela 14.

Tabela 14: Resultado do cálculo do Vetor de Consistência

Vetor Peso	Prioridade Relativa (w)	Vetor Consistência
2,041 ÷	0,398	= 5,13
0,166 ÷	0,031	= 5,34
0,276 ÷	0,051	= 5,41
0,435 ÷	0,080	= 5,44
2,301 ÷	0,440	= 5,23

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

O próximo passo foi calcular a média aritmética dos Vetores de Consistência (Tabela 14) para se obter o resultado do autovalor máximo (λ_{\max}), como demonstrado a seguir:

$$\lambda_{\max} = \frac{5,13 + 5,34 + 5,41 + 5,44 + 5,23}{5} = 5,31$$

O valor do CI, foi obtido utilizando-se a Fórmula (1).

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{5,31 - 5}{5 - 1} = 0,08$$

Para finalizar esta etapa, foi calculado o valor do CR, obtendo o valor de 1,12 (para 5 elementos) na Tabela de Valores de RI de Saaty (1991) e aplicando a Fórmula (2).

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,08}{1,12} = 0,07$$

Como o CR foi menor do que 0,10, as Prioridades Relativas deste especialista podem ser utilizadas no estudo.

Nas 16 matrizes produzidas nesta etapa, foram observadas algumas situações onde o CR foi igual ou superior a 0,10, como mostra a Tabela 15.

Tabela 15: Análise da ocorrência de inconsistências na comparação de critérios

Quantidade de critérios inconsistentes	Quantidade de Especialistas
0	6
1	4
2	3
3	2
4	1

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Pode-se observar na Tabela 15 que 81% dos especialistas (13) cometeram no máximo 2 inconsistências na avaliação dos critérios, sendo que 6 deles não cometeram nenhuma.

Na subseção 2.8.4 foi mostrado que caso o CR não apresentar valor inferior a 0,10, a recomendação é que os motivos sejam investigados e os especialistas convidados a revisarem as suas respostas.

Todos os especialistas que cometeram inconsistências foram procurados para reverem seus julgamentos. Nesta entrevista foi utilizada a Matriz de Perturbação de Critérios, apresentando para o especialista onde estava localizada a inconsistência, facilitando sua reavaliação. Todos concordaram com a indicação da matriz e alteraram os pesos, fazendo com que o valor do CR ficasse dentro dos limites aceitáveis.

A Tabela 16 apresenta um exemplo da Matriz de Perturbações utilizada para a entrevista de revisão das respostas de um dos especialistas.

Tabela 16: Matriz de Perturbações na comparação de critérios

Critério	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	0,90	0,75	1,33	1,11
C2	1,11	1	0,64	1,48	0,95
C3	1,33	1,55	1	0,33	1,48
C4	0,75	0,68	3,06	1	0,64
C5	0,90	1,05	0,68	1,55	1

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

No exemplo apresentado na Tabela 16, houve inconsistência na comparação entre os critérios C4 e C3, com um valor de 3,06 para o ϵ_{ij} , destacado na tabela. Este diagnóstico foi mostrado para o especialista e solicitou-se que ele reavaliasse sua pontuação de peso neste ponto da Matriz, levando em consideração os outros pesos atribuídos nas demais comparações feitas com estes critérios.

Na empresa 1 foram entrevistados nove especialistas e um deles apresentou um grau de inconsistência que não permitia um ajuste aceitável. Este especialista foi então excluído do grupo, o que é corroborado por Forman e Peniwati (1998) ao afirmarem que pode ser feita a exclusão de especialista da média geométrica final com base na taxa de inconsistência apresentada por ele.

A Tabela 17 apresenta o resultado da CR para cada um dos especialistas considerados na pesquisa após a revisão de seus julgamentos, mostrando que todos ficaram abaixo de 0,10, como recomendado.

Tabela 17: Taxa de Consistência (CR) obtida na comparação dos Critérios

Especialista	CR	Especialista	CR
E1	0,072	E9	0,085
E2	0,070	E10	0,084
E3	0,084	E11	0,098
E4	0,072	E12	0,077
E5	0,067	E13	0,044
E6	0,069	E14	0,090
E7	0,081	E15	0,073
E8	0,063		

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

4.2 DETERMINAÇÃO DAS PRIORIDADES RELATIVAS PARA AS ALTERNATIVAS

Em seguida, atribui-se pesos para cada alternativa em relação às outras duas, considerando seu impacto em cada critério. Mais uma vez, os pesos foram atribuídos utilizando como base os valores da Escala Fundamental de Saaty (1977) mostrada no Quadro 4.

A Tabela 18 mostra a matriz de comparação paritária das alternativas com as respostas de um dos especialistas. Nos Apêndices E, F, G, H e I são apresentadas as matrizes de todos os especialistas.

Tabela 18: Matriz de comparação paritária das alternativas

Alternativa	Severidade	Ocorrência	Detecção
Severidade	1	7	5
Ocorrência	1/7	1	1/3
Detecção	1/5	3	1

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Como mostrado na Tabela 18, na avaliação deste especialista a Severidade foi considerada com importância muito forte (peso 7) com relação à Ocorrência e forte (peso 5) com relação à Detecção, e a Detecção foi classificada como moderadamente mais importante (peso 3) que a Ocorrência.

A Tabela 19 apresenta os valores do Autovetor obtidos para os julgamentos realizados pelo especialista escolhido para este exemplo.

Tabela 19: Resultado do cálculo do Autovetor

Alternativa	Severidade	Ocorrência	Detecção	Autovetor
Severidade	1	7	5	3,27
Ocorrência	1/7	1	1/3	0,36
Detecção	1/5	3	1	0,84
Σ	1,34	11,00	6,33	4,48

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Obtidos os valores do Autovetor, apresentados na Tabela 19, chegou-se a última etapa que é o cálculo das Prioridades Relativas para cada alternativa, mostradas na Tabela 20.

Tabela 20: Resultado do cálculo da Prioridade Relativa

Alternativa	Severidade	Ocorrência	Detecção	Autovetor	Prioridade Relativa (w)
Severidade	1	7	5	3,27	0,73
Ocorrência	1/7	1	1/3	0,36	0,08
Detecção	1/5	3	1	0,84	0,19
Σ	1,34	11,00	6,33	4,48	1,00

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Conforme mostrado na Tabela 20, os valores obtidos no cálculo das Prioridades Relativas confirmam a superioridade da Severidade sobre as outras duas alternativas na preferência deste especialista, com um valor de 0,73, em segundo lugar a Detecção com 0,19 em seguida a Ocorrência com 0,08.

Assim como na comparação dos critérios, todas as matrizes foram submetidas ao Teste de verificação da Consistência realizando-se o cálculo do Vetor Peso para se chegar aos valores dos Vetores de Consistência para cada alternativa, como mostra a Tabela 21.

Tabela 21: Resultado do cálculo do Vetor de Consistência

Vetor Peso	Prioridade Relativa (w)	Vetor Consistência
2,233 ÷	0,73 =	3,06
0,245 ÷	0,08 =	3,06
0,581 ÷	0,19 =	3,06

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Em seguida foi calculado o autovalor máximo (λ_{\max}), obtendo 3,06 que foi utilizado para calcular o valor do CI, 0,03.

Para finalizar mais esta etapa, foi calculado o valor do CR de 0,07, considerando o valor de 0,58 (3 elementos) para o RI.

Como o CR foi menor do que 0,10, as Prioridades Relativas deste especialista podem ser utilizadas no estudo.

Nesta etapa foram produzidas 80 matrizes (16 especialistas respondendo a 5 matrizes cada) e ocorreram algumas situações onde o CR foi superior a 0,10, como mostra a Tabela 22.

Tabela 22: Análise da ocorrência de inconsistências na comparação das Alternativas

Quantidade de alternativas inconsistentes	Quantidade de Especialistas
0	1
1	1
2	4
3	6
4	1
5	3

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Aqui também todos os especialistas que cometeram inconsistências foram procurados para revisarem seus julgamentos. Nesta entrevista foi utilizada a Matriz de Perturbação para as Alternativas, apresentando para o especialista onde estava localizada a inconsistência, facilitando sua reavaliação. Todos concordaram com a indicação da matriz e alteraram os pesos, trazendo o valor do CR para dentro dos limites aceitáveis.

Os resultados da CR para cada um dos especialistas, após a revisão de seus julgamentos, são mostrados na Tabela 23.

Tabela 23: Taxa de Consistência (CR) obtida na comparação das Alternativas

(continua)

Especialista	Valores de CR				
	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Critério 4	Critério 5
E1	0,000	0,000	0,033	0,033	0,000
E2	0,000	0,056	0,056	0,069	0,069
E3	0,056	0,056	0,025	0,000	0,033
E4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
E5	0,000	0,011	0,000	0,033	0,069
E6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
E7	0,000	0,033	0,000	0,056	0,056
E8	0,056	0,000	0,000	0,056	0,069
E9	0,000	0,033	0,033	0,000	0,000
E10	0,006	0,033	0,000	0,006	0,006
E11	0,000	0,033	0,000	0,000	0,000

Tabela 23: Taxa de Consistência (CR) obtida na comparação das Alternativas
(conclusão)

Especialista	Valores de CR				
	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Critério 4	Critério 5
E12	0,000	0,069	0,056	0,000	0,000
E13	0,025	0,033	0,033	0,056	0,069
E14	0,056	0,033	0,033	0,056	0,000
E15	0,069	0,000	0,011	0,056	0,000

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

4.3 CÁLCULO DAS PRIORIDADES GLOBAIS

Seguindo as orientações dadas por Saaty (2008), o primeiro passo para chegar aos valores das Prioridades Globais foi calcular as médias geométricas das Prioridades Relativas dos critérios resultantes das 15 Matrizes de comparação geradas pelos especialistas, gerando uma tabela com as Prioridades Locais dos critérios. O segundo passo foi repetir este procedimento obtendo as Prioridades locais das alternativas para cada um dos critérios, gerando cinco tabelas.

A Tabela 24 apresenta os resultados da média geométrica das Prioridades Relativas (Prioridade Local) dos critérios dos 15 especialistas.

Tabela 24: Valores da Prioridade Local para os critérios

Critério	Prioridade Local
C1	0,421
C2	0,069
C3	0,032
C4	0,064
C5	0,399

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Analisando os resultados mostrados na Tabela 24, observa-se que o critério C1 foi o que apresentou um maior peso, com uma Prioridade Local de 0,421.

Na Tabela 25, estão representados os resultados das médias geométricas das Prioridades Relativas (Prioridade Local) das alternativas dos 15 especialistas, para cada critério.

Tabela 25: Valores da Prioridade Local para as alternativas

Prioridade Local					
Alternativa	C1	C2	C3	C4	C5
Severidade	0,45	0,28	0,19	0,26	0,46
Ocorrência	0,11	0,16	0,29	0,16	0,09
Detecção	0,19	0,32	0,31	0,33	0,22

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

Para calcular a Prioridade Global cada elemento da linha da alternativa foi multiplicado pela Prioridade Local do critério de sua respectiva coluna e o somatório dos resultados de cada linha indica o valor final da Prioridade Global, que em seguida é normalizada, dividindo cada uma delas pelo somatório total, conforme mostrado na Tabela 26.

Tabela 26: Valores da Prioridade Global

	Prioridade Local					Prioridade Global	Prioridade Global Normalizada
	C1	C2	C3	C4	C5		
	0,42	0,07	0,03	0,06	0,40		
SEVERIDADE	0,45	0,28	0,19	0,26	0,46	0,416	0,55
OCORRÊNCIA	0,11	0,16	0,29	0,16	0,09	0,112	0,15
DETECÇÃO	0,19	0,32	0,31	0,33	0,22	0,222	0,30

Fonte: Produção do próprio autor (2019).

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos na revisão da literatura e na pesquisa empírica com base em uma análise dos mesmos.

5.1 ASPECTOS RELATIVOS À REVISÃO DA LITERATURA

Conforme observado na Revisão da Literatura, a FMEA é considerada até os dias atuais como uma ferramenta altamente eficaz de antecipação e diminuição da possibilidade de falha durante o processo de design ou fabricação e que se propõe a gerenciar riscos através da identificação de potenciais falhas associadas a cada etapa de um processo. Tem sido elogiada por ser um método importante para o gerenciamento preventivo da qualidade, se destacar como uma das técnicas formais para o desenvolvimento eficaz de produtos, ser amplamente utilizada para examinar potenciais falhas em produtos, processos, projetos e serviços e, além da área automotiva e espacial, tem sido muito utilizada em outros setores da área produtiva e de serviços.

Apesar de todas estas vantagens, o método convencional de cálculo do RPN tem sido criticado extensivamente por uma série de questões e a literatura consultada sugere uma variedade de propostas alternativas que podem ser utilizadas em conjunto com a FMEA de forma a solucionar ou mitigar estas deficiências apresentadas, sendo que a lógica *Fuzzy* é a que aparece com maior frequência.

Com relação ao uso destas técnicas propostas, Aguiar (2016) comenta que na aplicação de outra técnica associada à FMEA, faz-se necessária uma interação específica com o método gerando dois fatores restritivos para a equipe, sendo um deles o tempo necessário para a aplicação do mesmo, normalmente incompatível com a disponibilidade dos especialistas, e o outro a necessidade de alguém, dentro da equipe, que conheça e saiba aplicar as ferramentas.

No caso de um método que utilize a lógica *Fuzzy*, por exemplo, existe a necessidade de que os especialistas realizem uma grande quantidade de julgamentos fazendo com que a atividade se torne demorada e onerosa (WANG *et al.*, 2009), além de exigir conhecimentos adicionais que muitas vezes não existem na equipe de especialistas (SONG *et al.*, 2014).

Shahin (2004) também afirma que propostas alternativas para aprimoração do cálculo do RPN têm sido sugeridas na literatura, mas estas apresentam alta complexidade em seu gerenciamento e a exigência de funcionários com conhecimento sobre as técnicas, exercendo funções específicas. O que não é comum nas empresas consideradas nesta pesquisa.

Durante o estudo dos artigos selecionados, alguns aspectos que corroboram com as afirmativas descritas anteriormente foram observados, mostrando que as propostas apresentadas, em sua maioria, são de elevada complexidade para seu uso no chão de fábrica. Tais constatações partiram das observações mostradas a seguir, onde pode-se notar que além de necessitar de um tempo precioso da equipe de especialistas, nem sempre disponível, exige a presença de profissionais com conhecimento técnico e específico sobre as ferramentas.

Na proposta apresentada por Bevilacqua, Braglia e Gabrielli (2000) o processo inicia com uma avaliação de criticidade para cada máquina onde são estabelecidos escores baseados em 7 fatores (Segurança, Importância da máquina para o processo, Custo de manutenção, Frequência de falha, Tempo de inatividade, Condições de funcionamento e Dificuldade de acesso). Em seguida, aplica-se o AHP atribuindo pesos para cada fator de criticidade e o RPN é calculado pelo somatório da multiplicação de cada fator por seu peso. Para finalizar, utiliza-se uma simulação de *Monte Carlo* gerando aleatoriamente conjuntos de pesos possíveis para encontrar, utilizando análise estatística, as máquinas mais críticas com o propósito de guiar a política de manutenção.

Chen e Wu (2013) apresentaram uma proposta de integração da FMEA com o AHP que utilizou seis critérios e dezessete subcritérios na avaliação dos RPNs. O processo inicia com o procedimento padrão da FMEA para definição dos valores da Severidade, Detecção e Ocorrência e aplica o AHP para determinar o peso de cada critério tomando como base a sua importância. Um novo RPN é então calculado considerando esses pesos dos critérios.

No modelo DEMATEL utilizado por Seyed-Hosseini, Safaei e Asgharpour (2006) a informação de falha na FMEA é descrita como um diagrama ponderado, onde as causas de falha são indicadas pelos nós e os efeitos dos modos de falha pelas conexões direcionadas, onde existem pesos indicando a gravidade dos efeitos de uma alternativa sobre a outra. As alternativas que apresentam mais efeito sobre outras devem ter maior prioridade. Desta forma, a priorização das alternativas será determinada pelo tipo das relações e pela gravidade da influência de cada modo de falha sobre o outro.

Pillay e Wang (2003) utilizaram uma abordagem *Fuzzy* cuja proposta introduz uma variável linguística como a saída da FMEA, expressa por cinco termos, Baixo, Bastante baixo, Moderado, Bastante alto e Alto. Os especialistas são solicitados a atribuir termos linguísticos que descrevem as três variáveis, Severidade, Ocorrência e Detecção. Em seguida é aplicada uma fórmula que utiliza os valores de uma tabela e a variável prioridade de atenção é determinada e representada graficamente. Uma base de 35 regras difusas é gerada com as

informações derivadas dos dois gráficos montados com as informações dos especialistas. A análise é concluída com a defusão dos termos linguísticos e aplicação da Teoria *Grey*.

Chang, Chang e Lee (2014) utilizaram uma abordagem em dois estágios sendo que no primeiro a TOPSIS é usada para reduzir os valores duplicados de RPN, em seguida a abordagem DEMATEL é aplicada para explorar as relações diretas e indiretas entre o modo de falha e a causa da falha. O procedimento proposto é organizado em onze etapas que incluem a definição de critérios para criar rankings e elaboração de matrizes de decisão para ranqueamento de S, O e D, além do uso de fórmulas e gráficos.

5.2 ASPECTOS RELATIVOS À PESQUISA EMPÍRICA

Quanto ao resultado apresentado na pesquisa empírica, analisando-se a Tabela 26, na seção 4.3, observa-se que a Severidade foi considerada pelos especialistas como o fator de risco de maior importância (55%), seguido respectivamente pela Detecção (30%) e Ocorrência (15%). Esta constatação corrobora com as orientações apresentadas na 4ª Edição do Manual de Referência da AIAG (AIAG,2008) que destaca a importância a ser dada para os modos de falha que apresentarem valores de Severidade elevados (9 ou 10), indicando que, nestes casos a equipe deve garantir que o risco seja resolvido através de controles de projeto existentes ou ações recomendadas, independente do resultado do RPN. Da mesma forma, este resultado mostra que os especialistas em aplicação da FMEA também possuem uma percepção que comprova as críticas apresentadas na literatura referentes ao fato de não se considerar a importância relativa dos 3 fatores de risco, colocando em dúvida a robustez do método.

Seguem dois exemplos identificados na literatura que corroboram com o resultado obtido na pesquisa com os especialistas onde ficou destacado considerar a maior importância da Severidade em comparação com os outros dois fatores.

Sachdeva, Kumar e Kumar (2009) realizaram pesquisa em uma fábrica de papel onde o estudo tinha a proposta de realizar uma análise de risco na manutenção da unidade de peneiramento. Neste trabalho eles afirmam que na aplicação da FMEA os fatores de risco S, O e D são considerados na avaliação da criticidade de um modo de falha. Mas eles destacam que existem outros parâmetros como facilidade de manutenção, disponibilidade de peças de reposição, segurança e custos (mão de obra, peças de reposição e perda de produção) que fazem parte do fator de risco mais amplo, a Severidade.

Na aplicação de uma FMEA de processo em uma fábrica de baterias de carros, Khorshidi, Gunawan e Ibrahim (2016) propõem um novo método, chamado URPN, que usa o conceito

Universal Generating Function (UGF) visando melhorar a avaliação de classificação dos fatores de risco. Eles mostram que neste novo método, a Severidade tem peso de importância diferente dos pesos de Ocorrência e Detecção e reforçam sua proposta afirmando que, na área da saúde por exemplo, os modos de falha com alta Severidade podem levar a consequências gravíssimas como a morte, por isso precisam ter um peso maior nas avaliações de risco.

Também corroborando com o resultado obtido na pesquisa empírica, observou-se que, quando alguns dos artigos analisados apresentavam exemplos numéricos ao discutirem a crítica relacionada ao fato dos 3 fatores de risco serem considerados com uma mesma importância relativa, estes exemplos se referiam ao fato da Severidade estar apresentando valores diferentes na avaliação de dois distintos modos de falha e a opção onde ela apresenta valor mais baixo ter um RPN considerado com maior ou igual prioridade que o outro onde ela apresenta valor mais elevado, destacando desta forma a importância da mesma com relação a Ocorrência e a Detecção (CERTA *et al.*, 2017; CHANG; CHANG; LEE, 2014; SELVAN *et al.*, 2013; CHANG; CHENG, 2011; KESKIN; ÖZKAN, 2009; CHIN *et al.*, 2009; SEYED-HOSSEINI; SAFAEI; ASGHARPOUR, 2006; PILLAY; WANG, 2003).

Para ilustrar o que foi mostrado no parágrafo anterior, pode-se usar o artigo de Nepal *et al.* (2008) onde eles afirmam que os especialistas podem ser enganados e desperdiçarem tempo e recursos corrigindo falhas menos críticas. Como exemplo eles apresentam a seguinte situação. Um modo de falha com $S = 6$, $O = 1$ e $D = 3$, terá um $RPN = 18$ e o outro com $S = 4$, $O = 2$ e $D = 3$, terá um $RPN = 24$. De acordo com eles, na prática, a prioridade será dada para correção do segundo modo de falha, mesmo que a Severidade do primeiro apresente um maior valor.

Finalizando a discussão sobre a Severidade, no caso dos artigos que utilizam novas técnicas e apresentam um comparativo de seus resultados com os de uma aplicação da FMEA na forma tradicional, os modos de falha que tiveram sua prioridade elevada após aplicação do novo modelo, são aquelas que têm um maior valor no peso da Severidade (LIU *et al.*, 2016b; LIU *et al.*, 2014; SONG *et al.*, 2013; KESKIN; ÖZKAN, 2009).

Uma outra constatação interessante diz respeito ao artigo publicado por Yeh e Chen (2014) onde eles apresentam uma proposta que aplica lógica *Fuzzy* e utilizam para comparação dos resultados, além do modelo com o cálculo tradicional do RPN ($S \times O \times D$) outras duas alternativas. Em uma delas, que eles denominaram “Método de classificação de dois fatores”, o RPN é calculado pela multiplicação da Severidade pela Ocorrência, desconsiderando a Detecção, o que contradiz o resultado apresentado nesta dissertação mostrando que, para os especialistas que utilizam a FMEA, a Detecção tem uma importância maior do que a Ocorrência.

6 CONCLUSÕES

Para elaboração desta dissertação foi realizada uma revisão da literatura contemplando em um primeiro momento os aspectos relacionados à FMEA mostrando seu histórico, aspectos conceituais importantes, os dois diferentes tipos de aplicação, o procedimento para sua elaboração, seus principais aspectos positivos, as críticas que são atribuídas ao cálculo do RPN na sua forma tradicional e algumas propostas que têm sido apresentadas para corrigir ou mitigar estas críticas.

Como na etapa empírica da pesquisa a proposta foi usar o Método AHP, na segunda fase da revisão da literatura o foco foi conhecer esta ferramenta, sua estruturação e o processo utilizado em sua aplicação.

6.1 QUANTO A REVISÃO DA LITERATURA

A literatura consultada mostrou que a FMEA teve seu primeiro relato registrado na década de 1920 e seu uso começou a ser documentado a partir dos anos 60 quando a NASA iniciou a prática de sua aplicação visando a confiabilidade de seus equipamentos. A indústria automotiva passou a usá-lo na década de 1970, acelerando esta prática 20 anos mais tarde quando empresas concorrentes do Extremo Oriente começaram a apresentar grandes desafios de qualidade e confiabilidade.

A FMEA é conhecida como um grupo sistematizado de atividades que têm como proposta principal identificar e avaliar os modos e causas potenciais de falhas associados ao projeto e fabricação de um produto, identificando ações para eliminar ou reduzir a chance de ocorrência destas evitando que as mesmas aconteçam durante a fabricação ou seu uso pelo cliente. Para isso, deve seguir um procedimento detalhado e ser aplicado por equipe multifuncional com conhecimento para analisar todo o ciclo de vida do produto e com capacidade de quantificar o potencial de perigo de um modo de falha classificando as prioridades de risco e as ações corretivas necessárias para que ele possa ser eliminado ou mitigado.

Muitos aspectos positivos relacionados à FMEA são destacados pelos autores consultados, como o fato de ser uma técnica utilizada para auxiliar, ainda na fase de projeto, na identificação dos possíveis modos de falha propondo ações para sua eliminação ou minimização, com possibilidade de aplicação até o final da vida útil do processo ou produto. É muito poderosa quando utilizada na identificação e eliminação de falhas melhorando a confiabilidade e a segurança de sistemas, produtos e serviços, sendo uma das ferramentas mais

eficientes na prevenção de problemas e identificação de soluções mais eficazes e pode ser aplicada em diferentes áreas, com destaque para a indústria automotiva.

Apesar de provar ser uma ferramenta para prevenção de riscos com boa aceitação em todas as áreas do setor produtivo e de serviços, evitando que falhas ocorram e cheguem ao cliente o método convencional de cálculo do RPN tem sido criticado na literatura por uma variedade de razões, sendo as principais o método de classificação do RPN não levar em consideração a importância relativa entre os fatores de risco, S, O e D e o fato de diferentes combinações de S, O e D poderem produzir um mesmo valor de RPN, com implicação de risco totalmente diferente.

Tendo como proposta a correção dos problemas indicados nas críticas citadas no parágrafo anterior muitas propostas têm sido apresentadas utilizando diversas técnicas ou métodos alternativos sendo que a maioria sugerindo o uso da lógica *Fuzzy*.

Quanto ao Método AHP, desenvolvido por Saaty na década de 1970, a literatura mostrou que ele tem sido utilizado de forma rotineira por possuir uma ampla estrutura para a tomada de decisão multicritério em análises de questões complexas de monitoramento e planejamento e por sua aplicabilidade em diferentes áreas.

O método começa com uma estruturação do problema onde é criada uma hierarquia tendo no topo o objetivo da decisão, no próximo nível os critérios e no nível mais baixo as alternativas. A etapa seguinte trata da construção das Matrizes de Comparação. Nestas matrizes são realizadas as comparações pareadas, onde cada elemento do nível superior é usado para comparar os elementos do próximo nível em relação a ele.

Concluídas as matrizes, recomenda-se uma verificação da consistência visando detectar possíveis contradições nos valores de peso atribuídos pelos especialistas. Caso a taxa de consistência (CR) for igual ou maior que 0,10 deve-se analisar os motivos e o especialista ser convidado a revisar suas respostas.

Validados os julgamentos de todos os especialistas, o passo final é calcular a consolidação das suas respostas.

6.2 QUANTO A QUESTÃO PROBLEMA E AS CONJECTURAS

A revisão da literatura mostrou que a FMEA, apesar de ser uma ferramenta amplamente utilizada na detecção de falhas, apresenta algumas fragilidades no que diz respeito ao cálculo do RPN, sobretudo por não considerar a importância relativa entre os 3 fatores de risco. Uma vez identificada a existência deste questionamento quanto à eficácia da FMEA na sua forma

original, este trabalho se propôs a buscar qual a importância relativa de cada um dos 3 fatores de risco (Severidade, Ocorrência e Detecção) dentro do cálculo do RPN na aplicação da FMEA.

A primeira conjectura foi confirmada porque na opinião dos especialistas entrevistados, a Severidade deve ser considerada com um peso maior que os outros fatores de risco, corroborando com a recomendação da AIAG. Esta predominância da Severidade também se confirmou na literatura consultada, onde os pesquisadores destacam sua importância, conforme demonstrado no subitem 5.2.

Já a segunda foi parcialmente refutada pois esperava-se um peso maior para a Severidade e a Ocorrência em comparação com a Detecção. Quanto a Severidade isso se confirmou, mas quanto a Ocorrência o resultado foi bem adverso, a Detecção foi considerada pelos especialistas com um peso duas vezes maior.

No caso da terceira, vários estudos que procuraram solucionar o problema da subjetividade do cálculo do RPN foram realizados, como foi abordado na revisão da literatura, mas eles utilizaram ferramentas que possuem alta complexidade de aplicação; o que é amplamente aceitável no meio acadêmico, porém não se sustenta no âmbito profissional da aplicação da FMEA.

6.3 QUANTO AOS OBJETIVOS E AOS RESULTADOS EMPÍRICOS

Os dois primeiros objetivos específicos foram atingidos com a revisão da literatura realizada que identificou os principais aspectos que necessitam ser aprimorados na FMEA e as propostas que já existem para que isso aconteça, com uma análise de sua aplicabilidade na área escolhida para a pesquisa, o setor automotivo.

A proposta de construir um passo a passo de como montar e aplicar um AHP também foi realizada permitindo que outros pesquisadores, quando forem utilizar esta ferramenta, encontrem as orientações necessárias para a realização de todas as suas etapas seguindo os exemplos práticos apresentados. Um arquivo em Excel com um modelo das Matrizes de Comparação pode ser acessado no link: https://drive.google.com/file/d/1GSSVcf-n1oBW97W7pAmDk2IUbjrwx_s_6/view?usp=sharing.

O terceiro objetivo específico deste trabalho também foi atingido ao ouvir a opinião de especialistas em FMEA, que atuam na área de produção do setor automotivo, para avaliar como estes profissionais consideram a importância relativa dos 3 fatores de risco.

Para garantir uma resposta consistente, foram escolhidas empresas que atuam em um Cluster Automotivo reconhecido como referência pois abriga as mais importantes fábricas

brasileiras deste setor. Somente nas empresas que participaram da pesquisa trabalham 1.043 funcionários, sendo 684 ligados diretamente à área de produção e destes, 16 aplicam efetivamente a FMEA no processo produtivo.

Os especialistas que participaram da pesquisa têm, em sua maioria mais de 5 anos de experiência na aplicação da FMEA em processos na área automotiva e o procedimento de entrevistas se desenvolveu por contato direto. Eles respondiam aos questionários após uma explicação sobre sua proposta, suas respostas eram imputadas em uma planilha com as matrizes de decisão que já fazia a avaliação de consistência e então, aqueles que apresentavam alguma inconsistência em seus resultados, eram chamados para revisarem seus julgamentos tendo como base uma Matriz de Perturbação que mostrava o ponto exato onde eles deveriam rever os pesos atribuídos.

O resultado mostrou que, para estes profissionais, a Severidade tem um grau de importância significativamente maior (55%) do que a Ocorrência (15%) e a Detecção (30%).

Este resultado confirma o destaque apresentado pelo Manual de Referência da AIAG que deve ser dado aos modos de falha que apresentam alto valor de Severidade, assim como os relatos observados na literatura, e indica a necessidade de um aprofundamento em pesquisas sobre este tema.

Com base nos resultados obtidos, julga-se que o objetivo geral da presente pesquisa, que era identificar o grau de prioridade a ser atribuído a cada um dos três fatores de risco, foi devidamente atingido.

Como ponto relevante, destaca-se o fato de que apenas profissionais com elevada experiência na aplicação da FMEA, aos quais pode-se atribuir o grau de especialistas nesta ferramenta, participaram da pesquisa.

6.4 QUANTO A RECOMENDAÇÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Como proposta de pesquisa futura sugere-se analisar a viabilidade de uma nova escala de pontuação para os 3 fatores de risco do RPN; escala essa que leve em consideração os pesos obtidos na presente pesquisa, ou seja 55% para Severidade, 15% para ocorrência e 30% para Detecção e estes valores podem ser validados realizando-se pesquisa em outros segmentos da indústria produtora de bens.

REFERÊNCIAS

- ABRIZAH, A. *et al.* LIS journals scientific impact and subject categorization: a comparison between Web of Science and Scopus. **Scientometrics**, Budapest, v. 94, n. 2, p. 721-740, 2013.
- AFSHARI, H.; ISSA, M. H.; RADWAN, A. Using failure mode and effects analysis to evaluate barriers to the greening of existing buildings using the leadership in energy and environmental design rating system. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 127, p. 195-203, 2016.
- AGUIAR, Dimas Campos. **Modelo conceitual para a aplicação de FMEA de processo na indústria automotiva**. Orientador: Valério Antonio Pamplona Salomon. 2016. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.
- ALTABBAKH, H. *et al.* Variations in risk management models: a comparative study of the space shuttle challenger disaster. **Engineering Management Journal**, Huntsville, v. 25, n. 2, p. 13-14, 2013.
- ANFAVEA. **Anuário da indústria automobilística brasileira**. São Paulo: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, 2019. Disponível em <http://www.anfavea.com.br>. Acesso em 23 dez. 2019.
- ARVANITTOYANNIS, I.S.; SAVELIDES, S.C. Application of failure mode and effect analysis and cause and effect analysis and Pareto diagram in conjunction with HACCP to a chocolate-producing industry: a case study of tentative GMO detection at pilot plant scale. **International Journal of Food Science and Technology**, Oxford, v. 42, n. 11, p. 1265-1289, 2007.
- ASHLEY, L.; ARMITAGE, G.; TAYLOR, J. Recognising and referring children exposed to domestic abuse: a multiprofessional, proactive systems-based evaluation using a modified Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). **Health & Social Care in the Community**, Manchester, v. 25, n. 2, p. 690-699, 2017.
- BANDUKA, N.; VEZA, I.; BILIC, B. An integrated lean approach to Process Failure Mode and Effect Analysis (PFMEA): a case study from automotive industry. **Advances in Production Engineering & Management**, Slovenia, v. 11, n. 4, p. 355-365, 2016
- BERTSCHE, B. **Reliability in automotive and mechanical engineering**: Determination of component and system reliability. Berlin: Springer, 2008. 500 p.
- BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M.; GABBRIELLI, R. Monte Carlo simulation approach for a modified FMECA in a power plant. **Quality and Reliability Engineering International**, Chichester, v. 16, n. 4, p. 313-324, 2000.
- BIN YUSOF, M. A.; ABDULLAH, N. H. BT. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) of butterfly valve in oil and gas industry. **Journal of Engineering Science and Technology**, Selangor, Special edition, p. 9-19, 2016.

- BOZDAG, E. *et al.* Risk prioritization in Failure Mode and Effects Analysis using Interval Type-2 fuzzy sets. **Expert Systems with Applications**, New York, v. 42, n. 8, p. 4000-4015, 2015.
- BRAAKSMA, A. J. J.; KLINGENBERG, W.; VELDMAN, J. Failure Mode and Effect Analysis in asset maintenance: a multiple case study in the process industry. **International Journal of Production Research**, London, v. 51, n. 4, p. 1055-1071, 2013.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN IEC 60812**. Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA). London: British Standards Institute, 2018. Disponível em: https://www.techstreet.com/standards/bs-en-iec-60812-2018?product_id=2028186. Acesso em: 28 jul. 2019.
- CERTA, A. *et al.* A Dempster-Shafer theory-based approach to the Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) under epistemic uncertainty: application to the propulsion system of a fishing vessel. **Reliability Engineering & System Safety**, Barking, v. 159, p. 69-79, 2017.
- CHADEGANI, A. A. *et al.* A Comparison between two main academic literature collections: Web of Science and Scopus databases. **Asian Social Science**, Richmond Hill, v. 9, n. 5, p. 1911-2025, 2013.
- CHANG, C.L.; WEI, C.C.; LEE, Y.H. Failure Mode and Effects Analysis using fuzzy method and grey theory, **Kybernetes**, Bradford, v. 28, n. 9, p. 1072-1080, 1999.
- CHANG, K.H.; CHENG, C.H. Evaluating the risk of failure using the fuzzy OWA and DEMATEL method. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Amsterdam, v. 22, n. 2, p. 113-129, 2011.
- CHANG, K.H. *et al.* An innovative approach integrating 2-tuple and lowga operators in process Failure Mode and Effects Analysis. **International Journal of Innovative Computing Information and Control**, Fukuoka, v. 8, n. 1B, p. 747-761, 2012.
- CHANG, K.H.; CHANG, Y.C.; LEE, Y.T. Integrating TOPSIS and DEMATEL methods to rank the risk of failure of FMEA. **International Journal of Information Technology & Decision Making**, Singapore, v. 13, n. 6, p. 1229-1257, 2014.
- CHANG, W.L.; TAY, K.M.; LIM, C.P. Clustering and visualization of failure modes using an evolving tree. **Expert Systems with Applications**, New York, v. 42, n. 20, p. 7235-7244, 2015.
- CHEN, P.S.; WU, M.T. A modified Failure Mode and Effects Analysis method for supplier selection problems in the supply chain risk environment: a case study. **Computers & Industrial Engineering**, New York, v. 66, n. 4, p. 634-642, 2013.
- CHEMWENO, P. *et al.* A dynamic risk assessment methodology for maintenance decision support. **Quality and Reliability Engineering International**, Chichester, v. 33, n. 3, p. 551-564, 2017.

- CHIN, K.S. *et al.* Failure Mode and Effects Analysis using a group-based evidential reasoning approach. **Computers & Industrial Engineering**, New York, v. 36, n. 6, p. 1768-1779, 2009.
- CHRYSLER CORPORATION; FORD MOTOR COMPANY; GENERAL MOTORS CORPORATION. **Potential Failure Modes and Effects Analysis (FMEA): reference Manual**. 4th. ed. [S.I]: AIAG, 2008. Disponível em: https://www.academia.edu/26573569/POTENTIAL_FAILURE_MODE_AND_EFFECTS_ANALYSIS_FMEA_Reference_Manual_Fourth_Edition. Acesso em: 17 abr. 2017.
- CLARKE, C. **Automotive production systems and standardization: from Ford to the case Mercedes-Benz**. Heidelberg: Physica, 2005. 248 p.
- DAGSUYU, C. *et al.* Classical and fuzzy FMEA risk analysis in a sterilization unit. **Computers & Industrial Engineering**, New York, v. 101, p. 286-294, 2016.
- DALE, B. *et al.* The use of quality management techniques and tools: an examination of some key issues. **International Journal of Technology Management**, Geneva, v. 16, n. 4-6, p. 305-325, 1998.
- DU, Y.X. *et al.* New failure mode and effects analysis: an evidential downscaling method. **Quality and Reliability Engineering International**, Chichester, v. 23, n. 2., p. 737-746, 2016.
- FORMAN, E. ; PENIWATI, K. Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 108, p. 165-169, 1998.
- FRANCESCHINI, F.; GALETTO, M. A new approach for evaluation of risk priorities of failure modes in FMEA. **International Journal of Production Research**, London, v. 39, n.13, p. 2991-3002, 2001
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 176 p.
- GUPTA, G.; MISHRA, R.P. A failure mode effect and criticality analysis of conventional milling machine using fuzzy logic: case study of RCM. **Quality and Reliability Engineering International**, Chichester, v. 33, n. 2, p. 347-356, 2017.
- HARKER, P. T.; VARGAS, L. G. The theory of ratio scale estimation: Saaty's analytic hierarchy process. **Management Science**, Providence, v. 33, n. 11, p. 1383-1403, 1987.
- HUANG, G. Q.; SHI, J.; MAK, KL. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) over the WWW. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 16, p. 603-608, 2000.
- INTERNATIONAL AUTOMOTIVE TASK FORCE. IATF 16949: requisitos para el sistema de gestión de la calidad en las organizaciones que fabrican piezas de producción y piezas de servicio en la industria automotriz. [S.I]: IATF, 2016. Disponível em: https://www.academia.edu/37886463/NORMA_DEL_SISTEMA_DE_GESTION_DE_LA_CALIDAD_AUTOMOTRIZ_IATF_16949. Acesso em: 22 dez. 2017.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60812**: analysis techniques for system reliability: procedures for Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). 2.ed. [S.l.]: International Electrotechnical Commission, 2006. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/publication/3571>. Acesso em: 22 dez. 2017.

ISHIZAKA, A.; NEMERY, P. **Multi-criteria decision analysis**: methods and software. Chichester: John Wiley & Sons, 2013. 296 p.

JOHNSON, K.G.; KHAN, M.K. A study into the use of the process Failure Mode and Effects Analysis (PFMEA) in the automotive industry in the UK. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 199, n. 1-3, p. 348-356, 2003.

KENGPOL, A.; TUAMMEE, S. The development of a decision support framework for a quantitative risk assessment in multimodal green logistics: an empirical study. **International Journal of Production Research**, London, v. 54, n. 4, p. 1020-1038, 2016.

KESKIN, G.A.; ÖZKAN, C. An alternative evaluation of FMEA: fuzzy ART algorithm. **Quality and Reliability Engineering International**, Chichester, v. 25, n. 6, p. 647-661, 2009.

KHORSHIDI, H.A.; GUNAWAN, I.; IBRAHIM, M.Y. Applying UGF concept to enhance the assessment capability of FMEA. **Quality and Reliability Engineering International**, Chichester, v. 32, n. 3, p. 1085-1093, 2016.

KUTLU, A.C.; EKMEKÇIOĞLU, M. Fuzzy Failure Modes and Effects Analysis by using fuzzy TOPSIS based fuzzy AHP. **Expert Systems with Applications**, New York, v. 39, n. 1, p. 61-67, 2012.

LINS, B. E. Breve história da Engenharia da Qualidade. **Cadernos Aslegis**, Brasília, v. 12, n. 4, p. 53-65, 2000.

LIU, H.C.; YOU, J.X.; YOU, X.Y. Evaluating the risk of healthcare failure modes using interval 2Tuple hybrid weighted distance measure. **Computers & Industrial Engineering**, New York, v. 78, p. 249-258, 2014.

LIU, H.C.; LIU, L.; LI, P. Failure Mode and Effects Analysis using intuitionistic fuzzy hybrid weighted Euclidean distance operator. **International Journal of Systems Science**, Hants, v. 45, n. 10, p. 2012-2030, 2014.

LIU, H.C. *et al.* Failure Mode and Effects Analysis using D numbers and Grey Relational Projection method. **Expert Systems with Applications**, New York, v. 41, n. 10, p. 4670-4679, 2014.

LIU, H.C. *et al.* Failure Mode and Effect Analysis under uncertainty: an integrated multiple criteria decision-making approach. **IEEE Transactions on Reliability**, New York, v. 65, n. 3, p. 1380-1392, 2016a.

- LIU, H.C. *et al.* Fuzzy Failure Mode and Effects Analysis using fuzzy evidential reasoning and belief rule-based methodology. **IEEE Transactions on Reliability**, New York, v. 62, n. 1, p. 23-36, 2013.
- LIU, H.C. *et al.* Failure Mode and Effects Analysis using intuitionistic fuzzy hybrid TOPSIS approach. **Soft Computing**, Salerno, v. 19, n. 4, p. 1085-1098, 2015a.
- LIU, H.C. *et al.* A novel approach for FMEA: combination of interval 2Tuple linguistic variables and Gray Relational Analysis. **Quality and Reliability Engineering International**, Chichester, v. 31, n. 5, p. 761-772, 2015b.
- LIU, H.C. *et al.* Risk evaluation in Failure Mode and Effects Analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment. **Expert Systems with Applications**, New York, v. 39, n. 17, p. 12926-12934, 2012.
- LIU, H.C. *et al.* Risk evaluation in Failure Mode and Effects Analysis using fuzzy digraph and matrix approach. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Amsterdam, v. 27, n. 4, p. 805-816, 2016b.
- LOLLI, F. *et al.* Flow Sort-GDSS - A novel group multicriteria decision support system for sorting problems with application to FMEA. **Expert Systems with Applications**, New York, v. 42, n. 17-18, p. 6342-6349, 2015.
- LOLLI, F. *et al.* A revised FMEA with application to a blow mounding process. **International Journal of Quality & Reliability Management**, Rotterdam, v. 33, n. 7, p. 900-919, 2016.
- MENTES, A.; OZEN, E. A hybrid risk analysis method for a yacht fuel system safety. **Safety Science**, Amsterdam, v. 79, p. 94-104, 2015.
- MONGEON, P.; PAUL-HUS, A. The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. **Scientometrics**, Budapest, v. 106, n. 1, p. 213-228, 2016.
- MOON, S.K. *et al.* Service reliability improvement in manufacturing and operating systems. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, Daejeon, v. 14, n. 8, p. 1401-1406, 2013.
- NEPAL B.P. *et al.* A framework for capturing and analyzing the failures due to system/component interactions. **Quality and Reliability Engineering International**, Chichester, v. 24, p. 265-289, 2008
- OZILGEN, S. Application of Failure Mode and Effect Analysis model to foodservice systems operated by chefs in practice and by chefs from a culinary school in Turkey. **Journal of Consumer Protection and Food Safety**, Berlin, v. 5, n. 3-4, p. 333-343, 2010.
- PAIVA, Alexandre Duarte de. **O cluster automotivo sul fluminense: experiência de aglomeração industrial ou ação coletiva empresarial?** Orientador: Raphael Jonathas da Costa Lima. 2016. 116 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Instituto de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2016.

PENTTI, H.; ATTE, H. **Failure mode and effects analysis of software** - based automation systems. Helsinki: STUK - Radiation and Nuclear Safety Authority, 2002.

PETER, G.; ROSNER, D. Towards task-oriented user support for Failure Mode and Effects Analysis. Multiple approaches to intelligent systems. **Lecture Notes in Artificial Intelligence**, Berlin, v. 1611, p. 266-275, 1999.

PILLAY, A.; WANG, J. Modified Failure Mode and Effects Analysis using approximate reasoning. **Reliability Engineering & System Safety**, Barking, v. 79, n. 1, p. 69-85, 2003.

PORTER, M. **Estratégia Competitiva: técnicas para análise da indústria e da concorrência**. 2.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004. 448 p.

PRASAD, S. Improving manufacturing reliability in ic package assembly using the FMEA technique. **IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology**, New York, v. 14, n. 3, p. 452-456, 1991.

PRODANOV, C.C.; FREITAS, E.C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2009. 277 p.

RAMANATHAN, R. ; GANESH, L. S. Group preference aggregation methods employed in AHP: an evaluation and an intrinsic process for deriving members' weightages. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 79, p. 249-265, 1994.

RATH, F. Tools for developing a quality management program: proactive tools (process mapping, value stream mapping, fault tree analysis, and Failure Mode and Effects Analysis). **International Journal of Radiation Oncology Biology Physics**, Massachusetts, v. 71, n. 1, p. S187-S190, 2008.

REZAEI, M.J.; SALIMI, A.; YOUSEFI, S. Identifying and managing failures in stone processing industry using cost-based FMEA. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 88, n. 9-12, p. 3329-3342, 2017.

ROGHANIAN, E.; MOJIBIAN, F. Fuzzy risk assessment for electrooptical target tracker. **Iranian Journal of Management Studies**, Tehran, v. 8, n. 3, p. 373-395, 2015.

ROY, B. The optimisation problem formulation: criticism and overstepping. **Journal of the Operational Research Society**, Oxford, v. 32, n. 6, p. 427-436, 1981.

ROY, S.K.; SARKAR, A.K.; MAHANTY, B. Using fuzzy FMEA and fuzzy logic in project risk management. **International Journal of Quality & Reliability Management**, Rotterdam, v. 33, n. 6, p. 830-851, 2016.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, New York, v. 15, n. 3, 1977.

SAATY, T. L. How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process. **European Journal**, North Holland, v. 9, p. 9-26, 1990.

SAATY, T. L. Some mathematical concepts of the Analytic Hierarchy Process. **Behaviormetrika**, Oxford, v. 29, p. 1-9, 1991.

SAATY, T. L. **Fundamentals of decision making and priority theory with the Analytic Hierarchy Process**. 2. ed. Pittsburgh: RWS Publications, 2000. 477 p.

SAATY, T. L. Decision-making with the AHP: why is the principal eigenvector necessary. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 145, p. 85-91, 2003.

SAATY, T. L. Decision making with the Analytic Hierarchy Process. **International Journal of Services Sciences**, Genebra, v.1, p. 83-98, 2008.

SACHDEVA, A.; KUMAR, D.; KUMAR, P. Multi-factor failure mode criticality analysis using TOPSIS. **Journal of Industrial Engineering International**, Berlin, v. 5, n. 8, p. 1-9, 2009.

SAFARI, H.; FARAJI, Z.; MAJIDIAN, S. Identifying and evaluating enterprise architecture risks using FMEA and fuzzy VIKOR. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Amsterdam, v. 27, n. 2, p. 475-486, 2016.

SANTOS, R. B.; OLIVEIRA, U. R.de; ROCHA, H. M. Failure mapping for occupational safety management in the film and television industry. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 203, p. 1-12, 2018.

SELIM, H.; YUNUSOGLU, M.G.; BALAMAN, S.Y. A dynamic maintenance planning framework based on fuzzy TOPSIS and FMEA: application in an international food company. **Quality and Reliability Engineering International**, Chichester, v. 32, n. 3, p. 795-804, 2016.

SELVAN, T.A. *et al.* Failure effects and resolution of modes: a novel FMEA treatise for finalizing mould designs in foundries. **South African Journal of Industrial Engineering**, Pretoria, v. 24, n. 2, p. 181-195, 2013.

SEYED-HOSSEINI, S.M. ; SAFAEI, N.; ASGHARPOUR, M. J. Reprioritization of failures in a system Failure Mode and Effects Analysis by decision making trial and evaluation laboratory technique. **Reliability Engineering & System Safety**, Barking, v. 91, n. 8, p. 872-881, 2006.

SHAHIN, A. Integration of FMEA and the Kano model: an exploratory examination. **International Journal of Quality & Reliability Management**, Rotterdam, v. 21, n. 7, p. 731-746, 2004.

SHARMA, R.K.; KUMAR, D.; KUMAR, P. Modeling system behavior for risk and reliability analysis using KBARM. **Quality and Reliability Engineering International**, Chichester, v. 23, n. 8, p. 973-998, 2007.

SHARMA, R.K.; KUMAR, D.; KUMAR, P. Fuzzy modeling of system behavior for risk and reliability analysis. **International Journal of Systems Science**, Hants, v. 39, n. 6, p. 563-581, 2008.

SHIMIZU, T. **Decisão nas organizações**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2006. 317 p.

SOCIETY OF AUTOMOBILE ENGINEERS. **SAE J1739**: potential failure mode and effects analysis in design (Design FMEA) and potential failure mode in manufacturing and assembly processes (Process FMEA) and effects analysis for machinery (Machinery FMEA). [S.l]: Society of Automotive Engineers, 2002. Disponível em: https://www.sae.org/standards/content/j1739_200901/. Acesso em: 17 abr. 2017.

SONG, W.Y. *et al.* Failure Modes and Effects Analysis using integrated weight based fuzzy TOPSIS. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, London, v. 26, n. 12, p. 1172-1186, 2013.

SONG, W.Y. *et al.* A rough TOPSIS approach for Failure Mode and Effects Analysis in uncertain environments. **Quality and Reliability Engineering International**, Chichester, v. 30, n. 4, p. 473-486, 2014.

TAY, K. M.; LIM, C. P. Enhancing the Failure Mode and Effect Analysis methodology with fuzzy inference techniques. **Journal of Intelligent & Fuzzy Systems**, Texas, v. 21, n. 12, p. 135-146, 2010.

TEOH, P.C.; CASE, K. Failure Modes and Effects Analysis through knowledge modelling. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 153, p. 253-260, 2004.

TOORANLOO, H.S.; AYATOLLAH, A.S. A model for Failure Mode and Effects Analysis based on intuitionistic fuzzy approach. **Applied Soft Computing**, Fukuoka, v. 49, p. 238-247, 2016.

US MILITARY STANDARD. **MIL-STD-1629A**: procedures for performing a failure mode, effect and criticality analysis. USA: Department of Defense, 1980. Disponível em: http://www.barringer1.com/mil_files/MIL-STD-1629RevA.pdf. Acesso em: 17 abr. 2017.

VAHDANI, B.; SALIMI, M.; CHARKHCHIAN, M. A new FMEA method by integrating fuzzy belief structure and TOPSIS to improve risk evaluation process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 77, n. 1-4, p. 357-368, 2015.

VELASQUEZ, M.; HESTER, P. T. An analysis of multi-criteria decision making methods. **International Journal of Operations Research**, Taiwan, v. 10, n. 2, p. 56-66, 2013.

XU, K. *et al.* Fuzzy assessment of FMEA for engine systems. **Reliability Engineering & System Safety**, Barking, v. 75, n. 1, p. 17-29, 2002.

WANG, L.E.; LIU, H.C.; QUAN, M.Y. Evaluating the risk of failure modes with a hybrid MCDM model under interval valued intuitionistic fuzzy environments. **Computers & Industrial Engineering**, New York, v. 102, p. 175-185, 2016.

WANG, Y.M. *et al.* Risk evaluation in Failure Mode and Effects Analysis using fuzzy weighted geometric mean. **Expert Systems with Applications**, New York, v. 36, n. 2., p. 1195-1207, 2009.

- WIND, J.; SAATY, T. Marketing applications of the Analytic Hierarchy Process. **Management Science**, Providence, v. 26, n. 7, p. 641- 658, 1980.
- YEH, T.M.; CHEN, L.Y. Fuzzy based risk priority number in FMEA for semiconductor wafer processes. **International Journal of Production Research**, London, v. 52, n. 7, p. 539-549, 2014.
- ZAMAN, M.B. *et al.* Fuzzy FMEA model for risk evaluation of ship collisions in the Malacca Strait: based on AIS data. **Journal of Simulation**, Basingstoke, v. 8, n. 1, p. 91-104, 2014.
- ZHANG, Z.F.; CHU, X.N. Risk prioritization in Failure Mode and Effects Analysis under uncertainty. **Expert Systems with Applications**, New York, v. 38, n. 1, p. 206-214, 2011.
- ZHOU, Q.J.; THAI, V.V. Fuzzy and grey theories in Failure Mode and Effect Analysis for tanker equipment failure prediction. **Safety Science**, Amsterdam, v. 83, p. 74-79, 2016.
- ZHOU, D.Y. ; TANG, Y.C.; JIANG, W. A modified model of Failure Mode and Effects Analysis based on generalized evidence theory. **Mathematical Problems in Engineering**, New York, v. 2016, 2016.
- ZHOU, H. *et al.* Data envelopment analysis application in sustainability: the origins, development and future directions. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 264, p. 1-16, 2018.

APÊNDICE A – Questionário com informações sobre os Especialistas.

QUESTIONÁRIO SOBRE O GRAU DE IMPORTÂNCIA ENTRE OS 3 FATORES DE RISCO DA FMEA

Este questionário faz parte de uma pesquisa sobre o grau de importância entre os 3 fatores de risco da FMEA (Severidade, Detecção e Ocorrência), realizada por Carlos Augusto Gabriel Menezes, da FEG UNESP, sob orientação dos Professores Dr Fernando Marins e Dr Ualison Rébula. Para a credibilidade da pesquisa, pedimos a sua colaboração no preenchimento desse questionário. Ressaltamos que todas as respostas permanecerão em sigilo e que as informações aqui fornecidas não serão disponibilizadas a terceiros.

INFORMAÇÕES SOBRE O RESPONDENTE

- ÁREA DE ATUAÇÃO NA EMPRESA:
- LOGÍSTICA E CADEIA DE SUPRIMENTOS
 - MANUFATURA
 - QUALIDADE
 - MANUTENÇÃO
 - OUTROS (gentileza especificar Abaixo)

FUNÇÃO ATUAL: _____

- TEMPO DE EXPERIÊNCIA NA INDÚSTRIA:
- MENOS DE 1 ANO
 - ENTRE 1 E 3 ANOS
 - ENTRE 3 E 5 ANOS
 - ENTRE 5 E 10 ANOS
 - MAIS DE 10 ANOS

- TEMPO DE ATUAÇÃO NA ÁREA AUTOMOTIVA:
- MENOS DE 1 ANO
 - ENTRE 1 E 3 ANOS
 - ENTRE 3 E 5 ANOS
 - ENTRE 5 E 10 ANOS
 - MAIS DE 10 ANOS

- TEMPO DE PRÁTICA COM O USO DA FMEA:
- MENOS DE 1 ANO
 - ENTRE 1 E 3 ANOS
 - ENTRE 3 E 5 ANOS
 - ENTRE 5 E 10 ANOS
 - MAIS DE 10 ANOS

APÊNDICE B – Questionário de comparação dos Critérios.

A FMEA é reconhecida mundialmente como uma ferramenta indispensável para a detecção de falhas, atuando de forma proativa e evitando suas ocorrências. Apesar de sua relevância vários pesquisadores apontam problemas na aplicação do cálculo do RPN na sua forma original. Observou-se na literatura que 62% das críticas fazem referência aos valores atribuídos aos fatores de risco, Severidade, Ocorrência e Detecção, por não se considerar a importância relativa entre os mesmos e pelo fato do RPN ser calculado pela simples multiplicação destes fatores, gerando valores iguais mas com possibilidade de apresentarem implicações de risco diferentes.

O Objetivo principal deste questionário é determinar qual dos 3 fatores de risco, Severidade, Ocorrência e Detecção é mais importante na avaliação de riscos em processos produtivos quando utilizamos a FMEA. Para isso foram definidos 5 diferentes Critérios que levam em consideração as possíveis consequências geradas caso a falha aconteça.

O questionário se divide em 2 partes, sendo que a primeira (na presente aba) tem por finalidade determinar o grau comparativo de importância dos 5 Critérios definidos ao se fazer a avaliação de riscos em processos produtivos usando a FMEA. A segunda parte (na aba QUESTIONÁRIO FATORES DE RISCO) tem por finalidade comparar o grau de importância dos 3 Fatores de Risco (Severidade, Ocorrência e Detecção) ao analisarmos cada um dos 5 Critérios.

Marque um "x" sobre o valor escolhido utilizando a Escala abaixo para realizar as comparações entre os Critérios.

Escala de Prioridades dos Critérios

Valor	Definição	Explicação
1	Igual importância	Os dois parâmetros são igualmente danosos (prejudiciais)
3	Importância moderada	Um dos parâmetros é moderadamente mais danoso (prejudicial) que o outro
5	Importância forte	Um dos parâmetros é fortemente mais danoso (prejudicial) que o outro
7	Importância Muito forte	Um dos parâmetros é muito mais danoso (prejudicial) que o outro
9	Importância extrema	Um dos parâmetros é extremamente mais danoso (prejudicial) que o outro

Exemplos:

O Critério B é FORTEMENTE MAIS DANOSO (prejudicial) que o Critério A

Critério	Avaliação									Critério
A							X			B
	9	7	5	3	1	3	5	7	9	

O critério A é MUITO MAIS DANOSO (prejudicial) que o critério B.

Critério	Avaliação									Critério
A		X								B
	9	7	5	3	1	3	5	7	9	

Pergunta: Considerando todas as ações para a fabricação de um veículo, desde a entrada de matéria-prima até a sua utilização por seu usuário, qual dos dois Critérios é mais importante na Avaliação de Riscos quando aplicamos o FMEA?

	Critério	Avaliação									Critério	
C1	A falha ocorrendo externamente a empresa, com o veículo em uso pelo consumidor final, irá causar a perda de controle do mesmo pelo motorista com possibilidade de provocar danos físicos e/ou materiais.	9	7	5	3	1	3	5	7	9	A falha ocorrendo externamente a empresa, com o veículo em uso pelo consumidor final, irá provocar a interrupção de seu funcionamento demandando serviços de manutenção e/ou seguro.	C2
C1	A falha ocorrendo externamente a empresa, com o veículo em uso pelo consumidor final, irá causar a perda de controle do mesmo pelo motorista com possibilidade de provocar danos físicos e/ou materiais.	9	7	5	3	1	3	5	7	9	A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, interromperá a operação atrasando entregas, mas não gerará danos em peças e/ou equipamentos produtivos.	C3
C1	A falha ocorrendo externamente a empresa, com o veículo em uso pelo consumidor final, irá causar a perda de controle do mesmo pelo motorista com possibilidade de provocar danos físicos e/ou materiais.	9	7	5	3	1	3	5	7	9	A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, irá provocar danos em peças e/ou equipamentos produtivos e interromperá a operação atrasando entregas.	C4
C1	A falha ocorrendo externamente a empresa, com o veículo em uso pelo consumidor final, irá causar a perda de controle do mesmo pelo motorista com possibilidade de provocar danos físicos e/ou materiais.	9	7	5	3	1	3	5	7	9	A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, irá provocar acidentes com danos físicos ao operador de produção.	C5
C2	A falha ocorrendo externamente a empresa, com o veículo em uso pelo consumidor final, irá provocar a interrupção de seu funcionamento demandando serviços de manutenção e/ou seguro.	9	7	5	3	1	3	5	7	9	A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, interromperá a operação atrasando entregas, mas não gerará danos em peças e/ou equipamentos produtivos.	C3
C2	A falha ocorrendo externamente a empresa, com o veículo em uso pelo consumidor final, irá provocar a interrupção de seu funcionamento demandando serviços de manutenção e/ou seguro.	9	7	5	3	1	3	5	7	9	A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, irá provocar danos em peças e/ou equipamentos produtivos e interromperá a operação atrasando entregas.	C4
C2	A falha ocorrendo externamente a empresa, com o veículo em uso pelo consumidor final, irá provocar a interrupção de seu funcionamento demandando serviços de manutenção e/ou seguro.	9	7	5	3	1	3	5	7	9	A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, irá provocar acidentes com danos físicos ao operador de produção.	C5
C3	A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, interromperá a operação atrasando entregas, mas não gerará danos em peças e/ou equipamentos produtivos.	9	7	5	3	1	3	5	7	9	A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, irá provocar danos em peças e/ou equipamentos produtivos e interromperá a operação atrasando entregas.	C4
C3	A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, interromperá a operação atrasando entregas, mas não gerará danos em peças e/ou equipamentos produtivos.	9	7	5	3	1	3	5	7	9	A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, irá provocar acidentes com danos físicos ao operador de produção.	C5
C4	A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, irá provocar danos em peças e/ou equipamentos produtivos e interromperá a operação atrasando entregas.	9	7	5	3	1	3	5	7	9	A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, irá provocar acidentes com danos físicos ao operador de produção.	C5

APÊNDICE C – Questionário de comparação das Alternativas.

Na planilha anterior, foi analisado o grau comparativo de importância dos 5 Critérios ao se fazer a avaliação de riscos em processos produtivos usando a FMEA. Esta segunda parte tem como proposta comparar o grau de importância dos 3 Fatores de Risco (Severidade, Ocorrência e Detecção), definidos abaixo, ao analisarmos cada um dos 5 Critérios apresentados na planilha anterior (aba QUESTIONÁRIO CRITÉRIOS).

Considerando que:

A SEVERIDADE considera a pior consequência provocada por um modo de falha com potencial de ocorrer afetando diretamente o cliente (interno e/ou externo).

A OCORRÊNCIA é um dado estatístico que avalia com que frequência uma causa específica pode provocar um modo de falha.

A DETECÇÃO está relacionada com a chance de não se detectar um modo de falha potencial antes que este se transforme em um efeito.

Utilize a Escala abaixo para realizar as comparações entre os Fatores de Risco (Severidade, Ocorrência e Detecção).

Escala de Prioridades dos Fatores de Risco

Valor	Definição	Explicação
1	Igual importância	Os dois parâmetros são igualmente relevantes (importantes)
3	Importância moderada	Um dos parâmetros é moderadamente mais relevante (importante) que o outro
5	Importância forte	Um dos parâmetros é fortemente mais relevante (importante) que o outro
7	Importância Muito forte	Um dos parâmetros é muito mais relevante (importante) que o outro
9	Importância extrema	Um dos parâmetros é extremamente mais relevante (importante) que o outro

Exemplos:

O Fator de Risco **B** é FORTEMENTE MAIS RELEVANTE (importante) que o Fator de Risco **A**.

Fator de Risco	Avaliação					Fator de Risco			
A					X	B			
	9	7	5	3	1	3	5	7	9

O Fator de Risco **A** é MUITO MAIS RELEVANTE (Importante) que o Fator de Risco **B**.

Fator de Risco	Avaliação					Fator de Risco			
A	X					B			
	9	7	5	3	1	3	5	7	9

Imagine que você está realizando um FMEA de um processo produtivo, só que aqui você tem como objetivo avaliar o grau de importância entre os 3 Fatores de Risco (Severidade, Ocorrência e Detecção) considerando as definições apresentadas acima e cada um dos 5 Critérios apresentados na planilha anterior. **Quando comparamos dois Fatores de Risco entre si, qual na sua opinião é mais importante para a análise do modo de falha visando a priorização das ações corretivas?**

O processo de resposta permanece similar ao anterior, ou seja, marque um x na parte superior do valor escolhido para cada um dos 5 critérios apresentados abaixo.

Atenção: É importante lembrar que estamos fazendo uma avaliação do grau de importância entre os 3 Fatores, sendo assim, para evitar inconsistências em suas respostas, é preciso considerar as pontuações dadas nas 2 primeiras comparações quando for fazer a

Exemplos:

Fator de Risco	Avaliação					Fator de Risco			
A	X					B			
	9	7	5	3	1	3	5	7	9
A		X				C			
	9	7	5	3	1	3	5	7	9
B				X		C			
	9	7	5	3	1	3	5	7	9

O Fator de Risco **A** foi avaliado com Importância MUITO FORTE (7) sobre o Fator de Risco **B** e com Importância FORTE (5) sobre o Fator de Risco **C**. Neste caso, teoricamente, você está considerando que a Importância do Fator de Risco **C** é MODERADAMENTE (3) mais relevante que a do Fator de

Fator de Risco	Avaliação					Fator de Risco			
A					X	B			
	9	7	5	3	1	3	5	7	9
A					X	C			
	9	7	5	3	1	3	5	7	9
B			X			C			
	9	7	5	3	1	3	5	7	9

Os Fatores de Risco **B** e **C** foram avaliados com Importância MUITO FORTE (7) sobre o Fator de Risco **A**. Neste caso, teoricamente, você está considerando o Fator de Risco **B** é IGUALMENTE (1) importante que a do Fator de Risco **C**.

Critério 1: A falha ocorrendo externamente a empresa, com o veículo em uso pelo consumidor final, irá causar a perda de controle do mesmo pelo motorista com possibilidade de provocar danos físicos e/ou materiais.

Fator de Risco	Avaliação									Fator de Risco
Severidade	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Ocorrência
Severidade	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Deteção
Ocorrência	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Deteção

Critério 2: A falha ocorrendo externamente a empresa, com o veículo em uso pelo consumidor final, irá provocar a interrupção de seu funcionamento demandando serviços de manutenção e/ou seguro.

Fator de Risco	Avaliação									Fator de Risco
Severidade	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Ocorrência
Severidade	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Deteção
Ocorrência	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Deteção

Critério 3: A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, interromperá a operação atrasando entregas, mas não gerará danos em peças e/ou equipamentos produtivos.

Fator de Risco	Avaliação									Fator de Risco
Severidade	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Ocorrência
Severidade	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Deteção
Ocorrência	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Deteção

Critério 4: A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, irá provocar danos em peças e/ou equipamentos produtivos e interromperá a operação atrasando entregas.

Fator de Risco	Avaliação									Fator de Risco
Severidade	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Ocorrência
Severidade	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Deteção
Ocorrência	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Deteção

Critério 5: A falha ocorrendo internamente a empresa, durante a produção, irá provocar acidentes com danos físicos ao operador de produção.

Fator de Risco	Avaliação									Fator de Risco
Severidade	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Ocorrência
Severidade	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Deteção
Ocorrência	9	7	5	3	1	3	5	7	9	Deteção

APÊNDICE D – Matriz de comparação paritária dos Critérios.

ESPECIALISTA 1

Comparação Paritária						Autovetor	Prioridade Relativa (w)
Critério	C1	C2	C3	C4	C5		
C1	1	9	9	9	1	3,74	0,42
C2	1/9	1	3	1	1/9	0,52	0,06
C3	1/9	1/3	1	1/5	1/9	0,24	0,03
C4	1/9	1	5	1	1/9	0,57	0,07
C5	1	9	9	9	1	3,74	0,42
Σ	2,33	20,33	27,00	20,20	2,33	8,81	1,00

ESPECIALISTA 2

Comparação Paritária						Autovetor	Prioridade Relativa (w)
Critério	C1	C2	C3	C4	C5		
C1	1	9	7	7	1	3,38	0,398
C2	1/9	1	1/3	1/3	1/9	0,27	0,031
C3	1/7	3	1	1/3	1/9	0,44	0,051
C4	1/7	3	3	1	1/9	0,68	0,080
C5	1	9	9	9	1	3,74	0,440
Σ	2,40	25,00	20,33	17,67	2,33	8,50	1,00

ESPECIALISTA 3

Comparação Paritária						Autovetor	Prioridade Relativa (w)
Critério	C1	C2	C3	C4	C5		
C1	1	7	9	5	1	3,16	0,397
C2	1/7	1	3	1/5	1/9	0,39	0,049
C3	1/9	1/3	1	1/5	1/7	0,25	0,032
C4	1/5	5	5	1	1/5	1,00	0,126
C5	1	9	7	5	1	3,16	0,397
Σ	2,45	22,33	25,00	11,40	2,45	7,97	1,00

ESPECIALISTA 4

Comparação Paritária						Autovetor	Prioridade Relativa (w)
Critério	C1	C2	C3	C4	C5		
C1	1	9	9	7	1	3,55	0,452
C2	1/9	1	3	3	1/5	0,72	0,092
C3	1/9	1/3	1	1/3	1/7	0,28	0,036
C4	1/7	1/3	3	1	1/5	0,49	0,062
C5	1	5	7	5	1	2,81	0,357
Σ	2,37	15,67	23,00	16,33	2,54	7,86	1,00

ESPECIALISTA 5

Comparação Paritária						Autovetor	Prioridade Relativa (w)
Critério	C1	C2	C3	C4	C5		
C1	1	7	9	7	1	3,38	0,400
C2	1/7	1	1	1	1/9	0,44	0,052
C3	1/9	1	1	1/5	1/9	0,30	0,036
C4	1/7	1	5	1	1/9	0,60	0,071
C5	1	9	9	9	1	3,74	0,442
Σ	2,40	19,00	25,00	18,20	2,33	8,46	1,00

ESPECIALISTA 6

Comparação Paritária						Autovetor	Prioridade Relativa (w)
Critério	C1	C2	C3	C4	C5		
C1	1	9	9	9	1	3,74	0,432
C2	1/9	1	5	1	1/9	0,57	0,066
C3	1/9	1/5	1	1/3	1/9	0,24	0,028
C4	1/9	1	3	1	1/7	0,54	0,063
C5	1	9	9	7	1	3,55	0,411
Σ	2,33	20,20	27,00	18,33	2,37	8,65	1,00

ESPECIALISTA 7

Comparação Paritária						Autovetor	Prioridade Relativa (w)
Critério	C1	C2	C3	C4	C5		
C1	1	7	9	7	3	4,21	0,514
C2	1/7	1	7	3	1/3	1,00	0,122
C3	1/9	1/7	1	1/3	1/9	0,23	0,028
C4	1/7	1/3	3	1	1/7	0,46	0,056
C5	1/3	3	9	7	1	2,29	0,280
Σ	1,73	11,48	29,00	18,33	4,59	8,19	1,00

ESPECIALISTA 8

Comparação Paritária						Autovetor	Prioridade Relativa (w)
Critério	C1	C2	C3	C4	C5		
C1	1	7	9	5	1	3,16	0,401
C2	1/7	1	3	1	1/5	0,61	0,078
C3	1/9	1/3	1	1/7	1/9	0,23	0,029
C4	1/5	1	7	1	1/7	0,72	0,092
C5	1	5	9	7	1	3,16	0,401
Σ	2,45	14,33	29,00	14,14	2,45	7,88	1,00

ESPECIALISTA 9

Comparação Paritária						Autovetor	Prioridade Relativa (w)
Critério	C1	C2	C3	C4	C5		
C1	1	9	9	7	1	3,55	0,424
C2	1/9	1	5	3	1/7	0,75	0,090
C3	1/9	1/5	1	1/3	1/9	0,24	0,029
C4	1/7	1/3	3	1	1/7	0,46	0,055
C5	1	7	9	7	1	3,38	0,403
Σ	2,37	17,53	27,00	18,33	2,40	8,39	1,00

ESPECIALISTA 10

Comparação Paritária						Autovetor	Prioridade Relativa (w)
Critério	C1	C2	C3	C4	C5		
C1	1	9	9	9	1	3,74	0,430
C2	1/9	1	5	3	1/7	0,75	0,086
C3	1/9	1/5	1	1/3	1/9	0,24	0,028
C4	1/9	1/3	3	1	1/9	0,42	0,048
C5	1	7	9	9	1	3,55	0,409
Σ	2,33	17,53	27,00	22,33	2,37	8,70	1,00

ESPECIALISTA 11

Comparação Paritária						Autovetor	Prioridade Relativa (w)
Critério	C1	C2	C3	C4	C5		
C1	1	9	9	7	1	3,55	0,423
C2	1/9	1	5	5	1/7	0,83	0,099
C3	1/9	1/5	1	1	1/9	0,30	0,036
C4	1/7	1/5	1	1	1/7	0,33	0,040
C5	1	7	9	7	1	3,38	0,402
Σ	2,37	17,40	25,00	21,00	2,40	8,40	1,00

ESPECIALISTA 12

Comparação Paritária						Autovetor	Prioridade Relativa (w)
Critério	C1	C2	C3	C4	C5		
C1	1	9	9	9	3	4,66	0,519
C2	1/9	1	3	3	1/9	0,64	0,072
C3	1/9	1/3	1	1	1/9	0,33	0,037
C4	1/9	1/3	1	1	1/9	0,33	0,037
C5	1/3	9	9	9	1	3,00	0,335
Σ	1,67	19,67	23,00	23,00	4,33	8,97	1,00

ESPECIALISTA 13

Comparação Paritária						Autovetor	Prioridade Relativa (w)
Critério	C1	C2	C3	C4	C5		
C1	1	9	9	9	1	3,74	0,426
C2	1/9	1	3	1	1/9	0,52	0,059
C3	1/9	1/3	1	1/3	1/9	0,27	0,030
C4	1/9	1	3	1	1/9	0,52	0,059
C5	1	9	9	9	1	3,74	0,426
Σ	2,33	20,33	25,00	20,33	2,33	8,78	1,000

ESPECIALISTA 14

Comparação Paritária						Autovetor	Prioridade Relativa (w)
Critério	C1	C2	C3	C4	C5		
C1	1	7	9	5	1	3,16	0,409
C2	1/7	1	5	3	1/7	0,79	0,102
C3	1/9	1/5	1	1/3	1/7	0,25	0,033
C4	1/5	1/3	3	1	1/5	0,53	0,068
C5	1	7	7	5	1	3,00	0,389
Σ	2,45	15,53	25,00	14,33	2,49	7,73	0,881

ESPECIALISTA 15

Comparação Paritária						Autovetor	Prioridade Relativa (w)
Critério	C1	C2	C3	C4	C5		
C1	1	9	9	5	1/3	2,67	0,304
C2	1/9	1	1	1/3	1/9	0,33	0,038
C3	1/9	1	1	1/5	1/9	0,30	0,034
C4	1/5	3	5	1	1/9	0,80	0,092
C5	3	9	9	9	1	4,66	0,531
Σ	4,42	23,00	25,00	15,53	1,67	8,76	0,998

APÊNDICE E – Matriz de comparação paritária das Alternativas para o Critério 1.

Especialista 1

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	9	9	4,33	0,82
Oc	1/9	1	1	0,48	0,09
Det	1/9	1	1	0,48	0,09
Σ	1,2	11,0	11,0	5,29	1,00

Especialista 2

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	9	9	4,33	0,82
Oc	1/9	1	1	0,48	0,09
Det	1/9	1	1	0,48	0,09
Σ	1,2	11,0	11,0	5,29	1,00

Especialista 3

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	7	5	3,27	0,73
Oc	1/7	1	1/3	0,36	0,08
Det	1/5	3	1	0,84	0,19
Σ	1,3	11,0	6,3	4,48	1,00

Especialista 4

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	9	9	4,33	0,82
Oc	1/9	1	1	0,48	0,09
Det	1/9	1	1	0,48	0,09
Σ	1,2	11,0	11,0	5,29	1,00

Especialista 5

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	7	7	3,66	0,78
Oc	1/7	1	1	0,52	0,11
Det	1/7	1	1	0,52	0,11
Σ	1,3	9,0	9,0	4,70	1,00

Especialista 6

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/9	1/9	0,23	0,05
Oc	9	1	1	2,08	0,47
Det	9	1	1	2,08	0,47
Σ	19,0	2,1	2,1	4,39	1,00

Especialista 7

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	3	3	2,08	0,60
Oc	1/3	1	1	0,69	0,20
Det	1/3	1	1	0,69	0,20
Σ	1,7	5,0	5,0	3,47	1,00

Especialista 8

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/3	5	1,19	0,28
Oc	3	1	7	2,76	0,65
Det	1/5	1/7	1	0,31	0,07
Σ	4,2	1,5	13,0	4,25	1,00

Especialista 9

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	9	9	4,33	0,82
Oc	1/9	1	1	0,48	0,09
Det	1/9	1	1	0,48	0,09
Σ	1,2	11,0	11,0	5,29	1,00

Especialista 10

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	9	1	2,08	0,49
Oc	1/9	1	1/7	0,25	0,06
Det	1	7	1	1,91	0,45
Σ	2,1	17,0	2,1	4,24	1,00

Especialista 11

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	9	9	4,33	0,82
Oc	1/9	1	1	0,48	0,09
Det	1/9	1	1	0,48	0,09
Σ	1,2	11,0	11,0	5,29	1,00

Especialista 12

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1	1/9	0,48	0,09
Oc	1	1	1/9	0,48	0,09
Det	9	9	1	4,33	0,82
Σ	11,0	11,0	1,2	5,29	1,00

Especialista 13

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	9	3	3,00	0,67
Oc	1/9	1	1/5	0,28	0,06
Det	1/3	5	1	1,19	0,27
Σ	1,4	15,0	4,2	4,47	1,00

Especialista 14

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	3	1/5	0,84	0,19
Oc	1/3	1	1/7	0,36	0,08
Det	5	7	1	3,27	0,73
Σ	6,3	11,0	1,3	4,48	1,00

Especialista 15

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	9	3	3,00	0,66
Oc	1/9	1	1/7	0,25	0,05
Det	1/3	7	1	1,33	0,29
Σ	1,4	17,0	4,1	4,58	1,00

APÊNDICE F – Matriz de comparação paritária das Alternativas para o Critério 2.

Especialista 1

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/3	1/3	0,48	0,14
Oc	3	1	1	1,44	0,43
Det	3	1	1	1,44	0,43
Σ	7,0	2,3	2,3	3,37	1,00

Especialista 2

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	7	5	3,27	0,73
Oc	1/7	1	1/3	0,36	0,08
Det	1/5	3	1	0,84	0,19
Σ	1,3	11,0	6,3	4,48	1,00

Especialista 3

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	7	5	3,27	0,73
Oc	1/7	1	1/3	0,36	0,08
Det	1/5	3	1	0,84	0,19
Σ	1,3	11,0	6,3	4,48	1,00

Especialista 4

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	7	7	3,66	0,78
Oc	1/7	1	1	0,52	0,11
Det	1/7	1	1	0,52	0,11
Σ	1,3	9,0	9,0	4,70	1,00

Especialista 5

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/5	1/7	0,31	0,08
Oc	5	1	1	1,71	0,44
Det	7	1	1	1,91	0,49
Σ	13,0	2,2	2,1	3,93	1,00

Especialista 6

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1	1/9	0,48	0,09
Oc	1	1	1/9	0,48	0,09
Det	9	9	1	4,33	0,82
Σ	11,0	11,0	1,2	5,29	1,00

Especialista 7

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	3	1/3	1,00	0,26
Oc	1/3	1	1/5	0,41	0,10
Det	3	5	1	2,47	0,64
Σ	4,3	9,0	1,5	3,87	1,00

Especialista 8

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	3	3	2,08	0,60
Oc	1/3	1	1	0,69	0,20
Det	1/3	1	1	0,69	0,20
Σ	1,7	5,0	5,0	3,47	1,00

Especialista 9

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	5	3	2,47	0,64
Oc	1/5	1	1/3	0,41	0,10
Det	1/3	3	1	1,00	0,26
Σ	1,5	9,0	4,3	3,87	1,00

Especialista 10

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/5	1/3	0,41	0,10
Oc	5	1	3	2,47	0,64
Det	3	1/3	1	1,00	0,26
Σ	9,0	1,5	4,3	3,87	1,00

Especialista 11

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	5	3	2,47	0,64
Oc	1/5	1	1/3	0,41	0,10
Det	1/3	3	1	1,00	0,26
Σ	1,5	9,0	4,3	3,87	1,00

Especialista 12

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/3	1/9	0,33	0,07
Oc	3	1	1/7	0,75	0,15
Det	9	7	1	3,98	0,79
Σ	13,0	8,3	1,3	5,07	1,00

Especialista 13

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	5	3	2,47	0,64
Oc	1/5	1	1/3	0,41	0,10
Det	1/3	3	1	1,00	0,26
Σ	1,5	9,0	4,3	3,87	1,00

Especialista 14

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	3	1/3	1,00	0,26
Oc	1/3	1	1/5	0,41	0,10
Det	3	5	1	2,47	0,64
Σ	4,3	9,0	1,5	3,87	1,00

Especialista 15

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/3	1	0,69	0,20
Oc	3	1	3	2,08	0,60
Det	1	1/3	1	0,69	0,20
Σ	5,0	1,7	5,0	3,47	1,00

APÊNDICE G – Matriz de comparação paritária das Alternativas para o Critério 3.

Especialista 1

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/3	3	1,00	0,26
Oc	3	1	5	2,47	0,64
Det	1/3	1/5	1	0,41	0,10
Σ	4,3	1,5	9,0	3,87	1,00

Especialista 2

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	7	5	3,27	0,73
Oc	1/7	1	1/3	0,36	0,08
Det	1/5	3	1	0,84	0,19
Σ	1,3	11,0	6,3	4,48	1,00

Especialista 3

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1	1/3	0,69	0,19
Oc	1	1	1/5	0,58	0,16
Det	3	5	1	2,47	0,66
Σ	5,0	7,0	1,5	3,74	1,00

Especialista 4

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/7	1/7	0,27	0,07
Oc	7	1	1	1,91	0,47
Det	7	1	1	1,91	0,47
Σ	15,0	2,1	2,1	4,10	1,00

Especialista 5

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/5	1/5	0,34	0,09
Oc	5	1	1	1,71	0,45
Det	5	1	1	1,71	0,45
Σ	11,0	2,2	2,2	3,76	1,00

Especialista 6

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/7	1/7	0,27	0,07
Oc	7	1	1	1,91	0,47
Det	7	1	1	1,91	0,47
Σ	15,0	2,1	2,1	4,10	1,00

Especialista 7

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/5	1/5	0,34	0,09
Oc	5	1	1	1,71	0,45
Det	5	1	1	1,71	0,45
Σ	11,0	2,2	2,2	3,76	1,00

Especialista 8

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/3	1	0,69	0,20
Oc	3	1	3	2,08	0,60
Det	1	1/3	1	0,69	0,20
Σ	5,0	1,7	5,0	3,47	1,00

Especialista 9

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/3	1/5	0,41	0,10
Oc	3	1	1/3	1,00	0,26
Det	5	3	1	2,47	0,64
Σ	9,0	4,3	1,5	3,87	1,00

Especialista 10

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1	3	1,44	0,43
Oc	1	1	3	1,44	0,43
Det	1/3	1/3	1	0,48	0,14
Σ	2,3	2,3	7,0	3,37	1,00

Especialista 11

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	5	5	2,92	0,71
Oc	1/5	1	1	0,58	0,14
Det	1/5	1	1	0,58	0,14
Σ	1,4	7,0	7,0	4,09	1,00

Especialista 12

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/5	1/7	0,31	0,07
Oc	5	1	1/3	1,19	0,28
Det	7	3	1	2,76	0,65
Σ	13,0	4,2	1,5	4,25	1,00

Especialista 13

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	5	3	2,47	0,64
Oc	1/5	1	1/3	0,41	0,10
Det	1/3	3	1	1,00	0,26
Σ	1,5	9,0	4,3	3,87	1,00

Especialista 14

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	3	1/3	1,00	0,26
Oc	1/3	1	1/5	0,41	0,10
Det	3	5	1	2,47	0,64
Σ	4,3	9,0	1,5	3,87	1,00

Especialista 15

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/7	1	0,52	0,12
Oc	7	1	5	3,27	0,75
Det	1	1/5	1	0,58	0,13
Σ	9,0	1,3	7,0	4,38	1,00

APÊNDICE H – Matriz de comparação paritária das Alternativas para o Critério 4.

Especialista 1

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	5	3	2,47	0,64
Oc	1/5	1	1/3	0,41	0,10
Det	1/3	3	1	1,00	0,26
Σ	1,5	9,0	4,3	3,87	1,00

Especialista 2

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	9	7	3,98	0,79
Oc	1/9	1	1/3	0,33	0,07
Det	1/7	3	1	0,75	0,15
Σ	1,3	13,0	8,3	5,07	1,00

Especialista 3

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1	1/7	0,52	0,11
Oc	1	1	1/7	0,52	0,11
Det	7	7	1	3,66	0,78
Σ	9,0	9,0	1,3	4,70	1,00

Especialista 4

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/5	1/5	0,34	0,09
Oc	5	1	1	1,71	0,45
Det	5	1	1	1,71	0,45
Σ	11,0	2,2	2,2	3,76	1,00

Especialista 5

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	5	3	2,47	0,64
Oc	1/5	1	1/3	0,41	0,10
Det	1/3	3	1	1,00	0,26
Σ	1,5	9,0	4,3	3,87	1,00

Especialista 6

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/7	1/7	0,27	0,07
Oc	7	1	1	1,91	0,47
Det	7	1	1	1,91	0,47
Σ	15,0	2,1	2,1	4,10	1,00

Especialista 7

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/7	1/3	0,36	0,08
Oc	7	1	5	3,27	0,73
Det	3	1/5	1	0,84	0,19
Σ	11,0	1,3	6,3	4,48	1,00

Especialista 8

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	5	7	3,27	0,73
Oc	1/5	1	3	0,84	0,19
Det	1/7	1/3	1	0,36	0,08
Σ	1,3	6,3	11,0	4,48	1,00

Especialista 9

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1	1/7	0,52	0,11
Oc	1	1	1/7	0,52	0,11
Det	7	7	1	3,66	0,78
Σ	9,0	9,0	1,3	4,70	1,00

Especialista 10

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	7	3	2,76	0,67
Oc	1/7	1	1/3	0,36	0,09
Det	1/3	3	1	1,00	0,24
Σ	1,5	11,0	4,3	4,12	1,00

Especialista 11

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	3	3	2,08	0,60
Oc	1/3	1	1	0,69	0,20
Det	1/3	1	1	0,69	0,20
Σ	1,7	5,0	5,0	3,47	1,00

Especialista 12

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1/7	1/7	0,27	0,07
Oc	7	1	1	1,91	0,47
Det	7	1	1	1,91	0,47
Σ	15,0	2,1	2,1	4,10	1,00

Especialista 13

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	7	3	2,76	0,65
Oc	1/7	1	1/5	0,31	0,07
Det	1/3	5	1	1,19	0,28
Σ	1,5	13,0	4,2	4,25	1,00

Especialista 14

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	3	1/5	0,84	0,19
Oc	1/3	1	1/7	0,36	0,08
Det	5	7	1	3,27	0,73
Σ	6,3	11,0	1,3	4,48	1,00

Especialista 15

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	5	1/3	1,19	0,28
Oc	1/5	1	1/7	0,31	0,07
Det	3	7	1	2,76	0,65
Σ	4,2	13,0	1,5	4,25	1,00

APÊNDICE I – Matriz de comparação paritária das Alternativas para o Critério 5.

Especialista 1

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	9	9	4,33	0,82
Oc	1/9	1	1	0,48	0,09
Det	1/9	1	1	0,48	0,09
Σ	1,2	11,0	11,0	5,29	1,00

Especialista 2

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	9	7	3,98	0,79
Oc	1/9	1	1/3	0,33	0,07
Det	1/7	3	1	0,75	0,15
Σ	1,3	13,0	8,3	5,07	1,00

Especialista 3

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	9	1	2,08	0,51
Oc	1/9	1	1/5	0,28	0,07
Det	1	5	1	1,71	0,42
Σ	2,1	15,0	2,2	4,07	1,00

Especialista 4

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	9	9	4,33	0,82
Oc	1/9	1	1	0,48	0,09
Det	1/9	1	1	0,48	0,09
Σ	1,2	11,0	11,0	5,29	1,00

Especialista 5

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	7	9	3,98	0,79
Oc	1/7	1	3	0,75	0,15
Det	1/9	1/3	1	0,33	0,07
Σ	1,3	8,3	13,0	5,07	1,00

Especialista 6

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	9	9	4,33	0,82
Oc	1/9	1	1	0,48	0,09
Det	1/9	1	1	0,48	0,09
Σ	1,2	11,0	11,0	5,29	1,00

Especialista 7

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	7	5	3,27	0,73
Oc	1/7	1	1/3	0,36	0,08
Det	1/5	3	1	0,84	0,19
Σ	1,3	11,0	6,3	4,48	1,00

Especialista 8

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	7	9	3,98	0,79
Oc	1/7	1	3	0,75	0,15
Det	1/9	1/3	1	0,33	0,07
Σ	1,3	8,3	13,0	5,07	1,00

Especialista 9

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1	1/9	0,48	0,09
Oc	1	1	1/9	0,48	0,09
Det	9	9	1	4,33	0,82
Σ	11,0	11,0	1,2	5,29	1,00

Especialista 10

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	9	1	2,08	0,49
Oc	1/9	1	1/7	0,25	0,06
Det	1	7	1	1,91	0,45
Σ	2,1	17,0	2,1	4,24	1,00

Especialista 11

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	7	7	3,66	0,78
Oc	1/7	1	1	0,52	0,11
Det	1/7	1	1	0,52	0,11
Σ	1,3	9,0	9,0	4,70	1,00

Especialista 12

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1	1/9	0,48	0,09
Oc	1	1	1/9	0,48	0,09
Det	9	9	1	4,33	0,82
Σ	11,0	11,0	1,2	5,29	1,00

Especialista 13

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	9	3	3,00	0,66
Oc	1/9	1	1/7	0,25	0,05
Det	1/3	7	1	1,33	0,29
Σ	1,4	17,0	4,1	4,58	1,00

Especialista 14

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	7	1	1,91	0,47
Oc	1/7	1	1/7	0,27	0,07
Det	1	7	1	1,91	0,47
Σ	2,1	15,0	2,1	4,10	1,00

Especialista 15

Comparação paritária				Autovetor	Prioridade Relativa (w)
ALT	Sev	Oc	Det		
Sev	1	1	1/9	0,48	0,09
Oc	1	1	1/9	0,48	0,09
Det	9	9	1	4,33	0,82
Σ	11,0	11,0	1,2	5,29	1,00