

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**UMA ABORDAGEM PARA FMEA BASEADA EM MÉTODOS
QUANTITATIVOS**

DIOGO NUNES DALOSTO

Agosto de 2018

Itajubá

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

DIOGO NUNES DALOSTO

**UMA ABORDAGEM PARA FMEA BASEADA EM MÉTODOS
QUANTITATIVOS**

Tese submetida ao Programa de Pós - Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de **Doutor em Ciências em Engenharia de Produção**.

Área de Concentração: Qualidade e Produto

Orientador: Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi

Agosto de 2018

Itajubá

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

DIOGO NUNES DALOSTO

**UMA ABORDAGEM PARA FMEA BASEADA EM
MÉTODOS QUANTITATIVOS**

Tese aprovada por banca examinadora em 02 de agosto de 2018, conferindo ao autor o título de **Doutor em Ciências em Engenharia de Produção**.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi (Orientador)

Prof. Dra. Danielle Martins Duarte Costa

Prof. Dr. Pedro José Papandrea

Prof. Dr. Alexandre Ferreira Pinho

Orientador: Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi

**Itajubá
2018**

Agradeço e dedico este trabalho...

Agradeço a Deus por tudo o que sou e conquistei, bem como por ter colocado desafios e pessoas maravilhosas na minha jornada, sempre me proporcionando o crescimento.

Dedico esta obra a toda minha querida família, em especial aos meus pais, que sempre me apoiaram nas minhas vitórias, derrotas e principalmente nos momentos de fraqueza. Dedico também ao ser mais especial, minha inspiração e motivação, meu filho Miguel e a minha esposa Andressa por estar ao meu lado nos momentos mais importantes.

RESUMO

Esta Tese apresenta uma abordagem para FMEA baseada em métodos quantitativos, através da análise do sistema de medição por atributos de Repetitividade e Reprodutividade (R&R). Com base em uma revisão sistemática da literatura sobre o FMEA, observou-se que diversas pesquisas apontam que os seus resultados possuem viés de subjetividade, posto que são gerados segundo interpretação e conceito de pessoas, que são por sua própria natureza, tendenciosas. A partir desta premissa, desenvolveu-se esta pesquisa com o escopo dividido em duas partes, na qual a primeira tem o objetivo de avaliar quantitativamente a subjetividade presente no processo de atribuição das notas do FMEA para os índices de Severidade, Ocorrência, Detecção e o RPN. Assim, por meio dos índices R&R de concordância ICC (*Interclass Correlation Coefficient*), índice de Kappa e uma concepção de matriz de confiabilidade para o índice de Kendall, analisou-se quantitativamente quatro casos de FMEA, dos quais inferiu-se que seus resultados, do ponto de vista estatístico, apresentaram subjetividade no processo de atribuição de notas. A partir destes resultados, desenvolveu-se a segunda parte do escopo da pesquisa, onde efetuou-se uma análise crítica sobre o FMEA, estabelecendo-se quais fatores causam a subjetividade nesta ferramenta e impactam na sua confiabilidade. Em vista disso, com o propósito de minimizar a subjetividade da ferramenta, propõem-se um novo modelo, chamado de “FMEA R&R”, estabelecendo-se diretrizes e uma estrutura metodológica para corroborar estatisticamente o FMEA. A fim de validar o FMEA R&R, empregou-se o modelo em um caso real da indústria, concluindo-se que o modelo minimiza a subjetividade e aumenta a eficiência do FMEA, em termos de confiabilidade para tomada de decisão e gerenciamento de riscos.

Palavras-Chave: FMEA, Abordagem Quantitativa, R&R, Confiabilidade.

ABSTRACT

This thesis presents an FMEA approach based on quantitative methods, through the analysis of the Repeatability and Reproducibility (R&R) attribute measurement system. Based on a systematic review of the literature on the FMEA, it has been observed that several studies indicate that their results have a bias of subjectivity, since they are generated according to the interpretation and concept of people, who are by their very nature biased. Based on this premise, this research was developed with a two-part scope, in which the first one has the objective of quantitatively evaluating the subjectivity present in the FMEA assignment process for the Severity, Occurrence, Detection and RPN. Thus, by R&R means of the ICC (Interclass Correlation Coefficient) agreement index, Kappa index and a reliability matrix design for the Kendall index, four cases of FMEA were quantitatively analyzed, from which it was inferred that their results, from the statistical point of view, presented subjectivity in the process of assigning notes. From these results, the second part of the scope of the research was developed, where a critical analysis was made on the FMEA, establishing which factors cause subjectivity in this tool and impact on its reliability. Therefore, in order to minimize the subjectivity of the tool, a new model, called "FMEA R&R", is proposed, establishing guidelines and a methodological framework to statistically corroborate the FMEA. In order to validate the FMEA R&R, the model was used in a real case of the industry, concluding that the model minimizes subjectivity and increases the efficiency of FMEA in terms of reliability for decision-making and risk management.

Keywords: FMEA, Quantitative Approach, R&R, Reliability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Número de trabalhos utilizando-se o FMEA	17
Figura 1-2 Número de publicações por ano sobre o FMEA.....	18
Figura 1-3 Escopo e estrutura de desenvolvimento da Tese.....	20
Figura 2-1 Formulário FMEA genérico.....	32
Figura 2-2 Fonte de dados do trabalho de Spreafico, Russo e Caterina Rizzi.....	34
Figura 2-3 Publicações sobre FMEA: artigos vs. patentes e academia vs. indústria.....	35
Figura 3-1 Fluxograma da análise estatística do FMEA	70
Figura 4-1 Etapas de análise do sistema FMEA FMAGDM.....	87
Figura 4-2 Gráfico de pontuações para a Severidade	96
Figura 4-3 Nível de concordância entre avaliador para a Severidade	97
Figura 4-4 Gráfico de atribuição das notas para Ocorrência	101
Figura 4-5 Nível de concordância entre avaliador para Ocorrência	102
Figura 4-6 Gráfico de atribuição das notas para Detecção	106
Figura 4-7 Nível de concordância entre avaliador para Detecção (<i>Within</i>).....	107
Figura 4-8 Gráfico do produto RPN	111
Figura 4-9 Nível de concordância entre avaliador para RPN (<i>Within</i>).....	112
Figura 4-10 Etapas de análise do sistema Fuzzy – FMEA	116
Figura 4-11 Regras de defuzzificação do FMEA Fuzzy no MATLAB.....	117
Figura 5-1 Roadmap do FMEA R&R.....	130
Figura 5-2 Formulário de avaliação - FMEA R&R.....	132

LISTA DE QUADROS

Quadro 2-1 Relevância do tipo de FMEA	29
Quadro 2-2 Etapas de elaboração do Formulário FMEA	31
Quadro 2-3 As principais deficiências do FMEA vs. Autores	36
Quadro 2-4 Problemas relacionados à aplicabilidade do FMEA.....	37
Quadro 2-5 Problemas relacionados relação de causa e efeito	37
Quadro 2-6 Problemas relacionados à análise de risco.....	38
Quadro 2-7 Objetivos da Análise de Concordância	50
Quadro 2-8 Critérios para a análise GR&R por atributos.....	52
Quadro 2-9 Objetivos da Análise GR&R por atributos.....	52
Quadro 2-10 Teste de hipóteses (<i>Fleiss' Kappa</i>)	57
Quadro 2-11 Teste de hipóteses (<i>W de Kendall</i>)	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 Classificação do índice de Fleiss' Kappa	72
Tabela 4-2 Faixas de aceitabilidade do índice de Kendall.....	74
Tabela 4-3 RPN do FMEA Tradicional.....	76
Tabela 4-4 Atributos de classificação para o FMEA tradicional.....	77
Tabela 4-5 Análise de Concordância para Severidade	78
Tabela 4-6 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Severidade.....	79
Tabela 4-7 Coeficiente de Kendall para Severidade.....	79
Tabela 4-8 Análise de Concordância para Ocorrência	79
Tabela 4-9 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Ocorrência.....	80
Tabela 4-10 Coeficiente de Kendall para Ocorrência.....	80
Tabela 4-11 Análise de Concordância para a Detecção	81
Tabela 4-12 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Detecção	81
Tabela 4-13 Coeficiente de Kendall para a Detecção.....	81
Tabela 4-14 Análise de Concordância para o RPN	82
Tabela 4-15 Coeficiente de Fleiss' Kappa para o RPN.....	82
Tabela 4-16 Coeficiente de Kendall para o RPN.....	83
Tabela 4-17 Tabela de atributo de classificação FMEA FMAGDM.....	85
Tabela 4-18 Tabela de RPN-Fuzzy trapezoidal (parte 1)	88
Tabela 4-19 Tabela de RPN-Fuzzy trapezoidal (parte 2)	88
Tabela 4-20 Tabela RPN defuzzificado.....	89
Tabela 4-21 Análise de Concordância.....	90
Tabela 4-22 Coeficiente de Fleiss' Kappa para o FMEA FMAGDM	90
Tabela 4-23 Coeficiente de Kendall para o FMEA FMAGDM	90
Tabela 4-24 FMEA Experimental 1	93
Tabela 4-25 FMEA Experimental 2	94
Tabela 4-26 FMEA Experimental 3	94
Tabela 4-27 Análise de concordância para a Severidade (<i>Within</i>)	96
Tabela 4-28 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Severidade (<i>Within</i>).....	98
Tabela 4-29 Coeficiente de Kendall para a Severidade (<i>Within</i>).....	99

Tabela 4-30 Análise de Concordância para a Severidade (<i>Between</i>)	99
Tabela 4-31 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Severidade (<i>Between</i>).....	100
Tabela 4-32 Coeficiente de Kendall para a Severidade (<i>Between</i>).....	100
Tabela 4-33 Análise de concordância para a Ocorrência (<i>Within</i>)	101
Tabela 4-34 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Ocorrência (<i>Within</i>) – Parte I	102
Tabela 4-35 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Ocorrência (<i>Within</i>) – Parte II.....	103
Tabela 4-36 Coeficiente de Kendall para a Ocorrência (<i>Within</i>).....	103
Tabela 4-37 Concordância observadores para a Ocorrência (<i>Between</i>)	104
Tabela 4-38 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Ocorrência (<i>Between</i>).....	104
Tabela 4-39 Coeficiente de Kendall para a Ocorrência (<i>Between</i>).....	105
Tabela 4-40 Análise de concordância para Detecção	106
Tabela 4-41 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Detecção (<i>Within</i>)	107
Tabela 4-42 Coeficiente de Kendall para Detecção (<i>Within</i>)	108
Tabela 4-43 Análise de Concordância para Detecção (<i>Between</i>).....	108
Tabela 4-44 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Detecção (<i>Between</i>)	109
Tabela 4-45 Coeficiente de Kendall para Detecção (<i>Between</i>)	109
Tabela 4-46 Análise de concordância para RPN (<i>Within</i>).....	111
Tabela 4-47 Coeficiente de Fleiss' Kappa para RPN (<i>Within</i>)	112
Tabela 4-48 Coeficiente de Kendall para RPN (<i>Within</i>)	112
Tabela 4-49 Análise de Concordância para RPN (<i>Between</i>)	113
Tabela 4-50 Coeficiente de Fleiss' Kappa para RPN (<i>Between</i>).....	113
Tabela 4-51 Coeficiente de Kendall para RPN (<i>Between</i>)	113
Tabela 4-52 Tabela de classificação FMEA Fuzzy <i>defuzificada</i>	118
Tabela 4-53 Análise de Concordância para Severidade	119
Tabela 4-54 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Severidade.....	120
Tabela 4-55 Coeficiente de Kendall para Severidade.....	120
Tabela 4-56 Análise de Concordância para Ocorrência	120
Tabela 4-57 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Ocorrência.....	121
Tabela 4-58 Coeficiente de Kendall para Ocorrência.....	121
Tabela 4-59 Análise de Concordância para a Detecção	121
Tabela 4-60 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Detecção	122

Tabela 4-61 Coeficiente de Kendall para a Detecção.....	122
Tabela 4-62 Análise de Concordância para o RPN	122
Tabela 4-63 Coeficiente de Fleiss' Kappa para o RPN.....	123
Tabela 4-64 Coeficiente de Kendall para o RPN.....	124
Tabela 4-65 Abordagem quantitativa - Consolidado.....	125
Tabela 5-1 Tabela de Critério FMEA R&R - Severidade	133
Tabela 5-2 Tabela de Critério FMEA R&R - Ocorrência	133
Tabela 5-3 Tabela de Critério FMEA R&R - Detecção	134
Tabela 5-4 Formulário de Confiabilidade do FMEA R&R	135
Tabela 5-5 Classificação da Confiabilidade do FMEA R&R.....	136
Tabela 5-6 Tabela de pontuação do caso FMEA R&R	140
Tabela 5-7 Análise de Concordância para a Severidade (<i>Between</i>)	141
Tabela 5-8 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Severidade (<i>Between</i>).....	142
Tabela 5-9 Coeficiente de Kendall para a Severidade (<i>Between</i>).....	142
Tabela 5-10 Concordância observadores para a Ocorrência (<i>Between</i>)	142
Tabela 5-11 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Ocorrência (<i>Between</i>).....	143
Tabela 5-12 Coeficiente de Kendall para a Ocorrência (<i>Between</i>).....	143
Tabela 5-13 Análise de Concordância para Detecção (<i>Between</i>).....	143
Tabela 5-14 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Detecção (<i>Between</i>)	144
Tabela 5-15 Coeficiente de Kendall para Detecção (<i>Between</i>)	144
Tabela 5-16 Análise de Concordância para RPN (<i>Between</i>)	145
Tabela 5-17 Coeficiente de Fleiss' Kappa para RPN (<i>Between</i>).....	145
Tabela 5-18 Coeficiente de Kendall para RPN (<i>Between</i>)	146
Tabela 5-19 Formulário de Confiabilidade do FMEA.....	146

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
DMAIC	Definir (<i>Define</i>), Medir (<i>Measure</i>), Analisar (<i>Analyze</i>), Melhorar (<i>Improve</i>) e Controlar (<i>Control</i>)
DRBFM	(<i>Design Review Based on Failure Mode</i>) – Projeto de Revisão baseado nos modos de falha
FMEA	(<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>) - Análise dos Modos e Efeitos de Falha
FTA	(<i>Fault Tree Analysis</i>) - Análise da Árvore de Falhas
GR&R	(<i>Gage Repeatability and Reproducibility</i>) - Estudo de Reprodutividade e repetitividade do Instrumento de Medição
ISO	(<i>International Organization for standardization</i>) - Organização Internacional de Padronização
MSA	(<i>Measurement System Analysis</i>) – Análise do Sistema de Medição
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
QFD	(<i>Quality Function Deployment</i>) - Desdobramento das ferramentas da qualidade)
ICC	<i>Interclass Correlation Coefficient</i>
R&R	(<i>Repeatability and Reproducibility</i>) - Reprodutividade e repetitividade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	16
1.2	O problema de pesquisa	18
1.3	Estrutura e o desenvolvimento da abordagem quantitativa ao FMEA	19
1.4	Objetivos	21
1.4.1	Objetivo Geral	21
1.4.2	Objetivos específicos	21
1.5	Organização da Tese	22
2	REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1	Considerações iniciais	23
2.2	A Análise de risco e falhas potenciais	23
2.3	Procedimentos de análise de falhas potenciais	24
2.4	FMEA	25
2.4.1	O que é o FMEA	25
2.4.2	Histórico do FMEA	26
2.4.3	Escopo e objetivos do FMEA	27
2.4.4	Tipos de FMEA	28
2.4.5	Estrutura do FMEA	30
2.4.5.1	O formulário de desenvolvimento do FMEA	31
2.4.5.2	Índices de prioridade de Risco	32
2.4.5.2.1	RPN – Número de Prioridade de Risco	33
2.4.6	Pesquisas sobre o FMEA	34
2.4.7	Subjetividade do FMEA	38
2.4.8	Ferramentas aliadas ao FMEA	40
2.5	MSA: Análise do sistema de medição	42
2.5.1	Conceito do MSA	42

2.5.2	Escopos e objetivos do MSA.....	43
2.5.3	Estudo GR&R.....	44
2.5.4	Cálculos e formulações.....	44
2.5.4.1	Dados do tipo contínuos.....	45
2.5.5	Variabilidade do sistema de medição	45
2.5.5.1	Fonte de variação	46
2.6	Análise de Concordância	47
2.6.1	Dados do tipo atributos.....	48
2.6.1.1	Tipos de dados atributos.....	49
2.6.2	Objetivos da análise de concordância.....	50
2.6.3	GR&R por atributos	51
2.6.4	Indicadores de Análise de Concordância.....	53
2.6.5	Escolha dos coeficientes de concordância desta pesquisa.....	54
2.6.5.1	Coeficiente de concordância de Fleiss' Kappa	55
2.6.5.1.1	Cálculos do coeficiente de Fleiss' Kappa.....	56
2.6.5.1.2	Interpretação de Fleiss' Kappa	57
2.6.5.2	Coeficiente de concordância de Kendall.....	58
2.6.5.2.1	O coeficiente de correlação Tau (τ) de Kendall.....	59
2.6.5.2.2	Coeficiente de concordância W de Kendall.....	60
2.6.5.2.3	Cálculos e formulações para W de Kendall.....	60
2.6.5.2.4	Interpretação do coeficiente de concordância de Kendall	62
2.6.5.3	<i>Interclass Correlation Coefficient (ICC)</i>	63
2.6.5.3.1	Cálculo do <i>Interclass Correlation Coefficient (ICC)</i>	63
2.6.5.3.2	Interpretação do <i>Interclass Correlation Coefficient (ICC)</i>	64
2.7	Considerações finais	65
3	MÉTODO DE PESQUISA	66

3.1	Considerações iniciais	66
3.2	Classificação desta pesquisa.....	66
3.3	Definição do método de pesquisa experimental.....	67
3.4	Análise estatística desta pesquisa	67
3.4.1	Justificativa dos índices estatísticos para a análise do FMEA nesta pesquisa.....	67
3.4.2	Desenvolvimento da análise estatística	69
3.5	Considerações finais.....	70
4	ABORDAGEM QUANTITATIVA AO FMEA	71
4.1	Análise estatística de Concordância do FMEA	71
4.1.1	<i>Interclass Correlation Coefficient (ICC)</i>	72
4.1.2	Matriz de classificação Fleiss' Kappa	72
4.1.3	Desenvolvimento da classificação por Kendall.....	73
4.1.4	Matriz de classificação Kendall.....	73
4.2	CASO 1 - Análise estatística do FMEA Tradicional.....	75
4.2.1	Base de dados do FMEA Tradicional.....	75
4.2.2	Análise dos Resultados: FMEA tradicional.....	78
4.2.2.1	Severidade	78
4.2.2.2	Ocorrência.....	79
4.2.2.3	Detecção.....	80
4.2.2.4	RPN.....	81
4.2.2.5	Conclusões sobre o FMEA tradicional	83
4.3	CASO 2 - Análise estatística do FMEA FMAGDM	83
4.3.1	Base de dados do FMEA FMAGDM	84
4.3.2	Análise dos Resultados: FMEA FMAGDM.....	86
4.3.2.1	Desenvolvimento da Análise.....	86
4.3.2.2	Análise de concordância aplicada ao FMEA FMAGDM	89
4.3.2.3	Conclusões sobre o FMEA FMAGDM.....	91

4.4 CASO 3 - Análise estatística do FMEA Experimental	92
4.4.1 Desenvolvimento do FMEA.....	92
4.4.2 Coleta dos dados do experimento.....	93
4.4.3 Análise dos dados	95
4.4.3.1 Severidade.....	95
4.4.3.1.1 Análise de Concordância entre observador (<i>Within</i>).....	95
4.4.3.1.2 Análise de Concordância dentre os observadores (<i>Between</i>).....	99
4.4.3.2 Ocorrência.....	100
4.4.3.2.1 Análise de Concordância entre observador (<i>Within</i>).....	101
4.4.3.2.2 Análise de Concordância dentre os observadores (<i>Between</i>).....	103
4.4.3.3 Detecção.....	105
4.4.3.3.1 Análise de Concordância entre observador (<i>Within</i>).....	105
4.4.3.3.2 Análise de Concordância dentre os observadores (<i>Between</i>).....	108
4.4.3.4 RPN – Número de Prioridade de Risco.....	110
4.4.3.4.1 Análise de Concordância entre observador (<i>Within</i>).....	110
4.4.3.4.2 Análise de Concordância dentre os observadores (<i>Between</i>).....	113
4.4.4 Conclusões sobre o FMEA Experimental	114
4.5 CASO 4 - Análise estatística do FMEA Fuzzy	115
4.5.1 Base de dados do FMEA Fuzzy	116
4.5.2 Análise dos Resultados: FMEA Fuzzy.....	119
4.5.2.1 Severidade.....	119
4.5.2.2 Ocorrência.....	120
4.5.2.3 Detecção.....	121
4.5.2.4 FRPN.....	122
4.5.2.5 Conclusões do FMEA Fuzzy	124
4.6 Conclusões sobre a abordagem quantitativa ao FMEA.....	125
5 PROPOSTA DE FMEA R&R.....	127

5.1 Proposta de FMEA R&R.....	127
5.2 Modelagem do FMEA R&R.....	129
5.3 Aplicação do FMEA R&R na indústria.....	137
5.3.1 Líder FMEA – Etapa 1	137
5.3.2 Etapa 2	138
5.3.3 Etapa 3	138
5.3.4 Etapa 4	139
5.3.5 Etapa 5	139
5.3.6 Etapa 6	139
5.3.7 Etapa 7: Abordagem Quantitativa	141
5.3.7.1 Severidade	141
5.3.7.2 Ocorrência	142
5.3.7.3 Detecção	143
5.3.7.4 RPN – Número de Prioridade de Risco.....	144
5.3.8 Etapas 8	146
5.3.9 Etapa 9	147
5.3.10 Etapa 10	147
5.3.11 Etapa 11	147
5.4 Conclusões sobre o FMEA R&R.....	147
6 CONCLUSÃO.....	149
6.1 Considerações finais	151
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	151
REFERÊNCIAS.....	152
ANEXO A – FMEA Experimental (Caso 3)	164
ANEXO B – FMEA R&R	165
ANEXO C – FMEA R&R	166
ANEXO D – FMEA R&R.....	167

1 INTRODUÇÃO

Nas indústrias e centros de pesquisa de todo o mundo a tarefa de estabelecer e priorizar os riscos de processos é fundamental para a garantia do sucesso de um projeto ou até mesmo para segurança do trabalho da operação e produção. Baseado nestas premissas, uma das ferramentas mais utilizadas é o FMEA, que possui enorme importância dentro das organizações para classificar e selecionar os modos potenciais de falha dos processos (TIAN, WANG E ZHANG, 2018). Spreafico, Russo e Caterina Rizzi (2017) destacam que o FMEA é uma ferramenta utilizada há mais de 70 anos e possui grande valor na indústria e pesquisas.

O FMEA é um acrônimo em inglês (*Failure Mode e Effect Analysis*), que traduzido para o português significa Análise dos Modos e Efeitos Falha. Este é um instrumento para identificar e reduzir falhas ou potenciais visando aumentar a confiabilidade e segurança de processos ou projetos, bem como destina-se a fornecer informações para a tomada de decisões de gestão dos riscos (LIU, LIU e LIU, 2013). Sobretudo, é a ferramenta mais utilizada para selecionar e priorizar os riscos (ROZENFELD, 2006) e é empregada em setores diversos, tais como metalúrgicas, indústria automobilísticas, área de energia (geração e gestão elétrica e nuclear), órgãos aeroespaciais. (LIU *et al.*, 2013).

Por meio do FMEA, a identificação e a categorização dos riscos é realizada primeiramente através de um formulário elaborado por uma equipe multidisciplinar, que enumera uma lista de riscos versus problemas ou causas potenciais (Carpitella *et al.*, 2018). A priorização dos riscos através do FMEA é realizada por meio da classificação desses riscos em termos do RPN (*Risk Priority Number*) ou em português: Número de Prioridade de Risco. O RPN é o resultado do produto de três parâmetros: Severidade da falha (S), a probabilidade de ocorrência da falha (O), e a probabilidade de não detectar a falha (D), que multiplicadas resultam no $RPN = S \times O \times D$.

Um dos principais motivos da utilização do FMEA se deve ao fato de ser uma ferramenta simples, largamente difundida e por isso se torna consolidada na indústria e pesquisa. Vale a pena destacar, que cada um dos integrantes do time que desenvolve o FMEA atribui a nota que julgar ser mais apropriada, o que proporciona flexibilidade para evoluir rapidamente e alcançar melhorias de processos.

No entanto, neste processo de atribuição de notas ao FMEA, segundo a revisão da literatura de Spreafico, Russo e Caterina Rizzi (2017), muitos pesquisadores apontam problemas como a

subjetividade. Em face disso, para superar tais problemas, através da revisão da literatura sobre este tema, detalhada nesta Tese, nota-se que o FMEA tem sido combinado com outras ferramentas para garantir maior confiabilidade dos seus resultados para tomada de decisão. A partir deste cenário, é possível questionar sobre os resultados que esta ferramenta qualitativa produz, por meio de uma análise quantitativa, partindo da premissa que o ser humano possui, por sua própria natureza, opiniões e conceitos diferentes entre si.

Dessa maneira, esta Tese tem a proposta de analisar estatisticamente o nível de concordância das avaliações que são realizadas pelos avaliadores do FMEA e a subjetividade desta ferramenta através de uma abordagem quantitativa por meio da análise de quatro casos de FMEA. Assim, pode-se inferir sobre a qualidade dos resultados desta ferramenta do ponto de vista técnico científico, estabelecendo o grau de subjetividade em termos de concordância.

Procedente desta abordagem, efetuou-se uma análise crítica para identificar e estabelecer quais são os problemas que causam a subjetividade do FMEA e, por consequência, impactam na confiabilidade dos seus resultados. À vista disso, propõe-se nesta Tese um novo modelo, nomeado de “FMEA R&R”, com o objetivo de minimizar sua subjetividade, através de diretrizes que eliminem traços de incerteza do processo de avaliação dos índices de risco S, O e D e aumente a confiabilidade desta ferramenta para tomada de decisão.

1.1 Justificativa

Embora se conheça a importância e utilização do FMEA há vários anos, sua abordagem quantitativa ainda é nova. Até a presente data, não foram encontrados registros na literatura de pesquisas publicadas empregando o FMEA de forma quantitativa, conforme o proposto nesta Tese.

Pode-se afirmar, com convicção, o ineditismo do tema a partir da análise de uma importante pesquisa de revisão de publicações sobre o FMEA publicada por de Liu, Liu, e Liu de 2013, na qual foram revisadas 75 publicações de 1992 até 2012 e, não há pesquisas análogas a esta Tese ou na mesma linha. Além disso, segundo o recente trabalho de revisão da literatura sobre o FMEA, dos autores Spreafico, Russo e Caterina Rizzi, publicado em 2017, a qual apresentam as principais aplicações do FMEA e suas tendências, revisando mais de 220 artigos científicos e 109 patentes, de 1978 até 2017, também não existem pesquisas relacionadas ao tema desta Tese.

As duas revisões da literatura sobre o tema FMEA destacam a importância desta ferramenta, principalmente por terem sido desenvolvidas e publicadas em tão curto espaço de tempo, isto é, em menos de 4 anos.

Também foi realizado um levantamento bibliométrico, a fim de balizar as publicações científicas divulgadas a respeito do FMEA, refinada por FMEA, bem como o termo em inglês *Failure Mode and Effect Analysis*. A referência desta busca foi a base de dados ISI – *Web of Science*, o qual foram coletadas informações de pesquisas em Julho de 2018.

A Figura 1-1 é um gráfico com o número de trabalhos que utilizaram o FMEA ao longo dos últimos anos até o ano de 2018. Pode-se observar o aumento da empregabilidade em pesquisas e indústria.

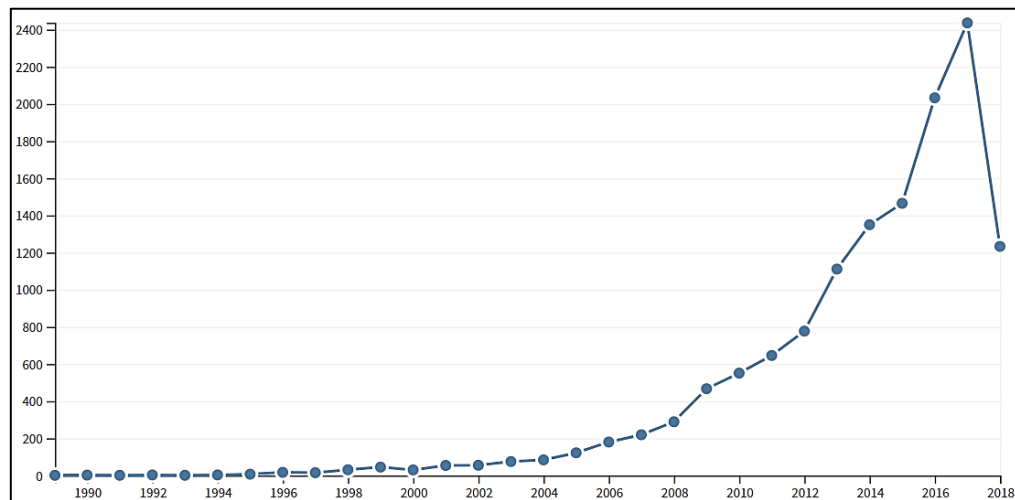


Figura 1-1 Número de trabalhos utilizando-se o FMEA
Fonte: adaptado de Web of Knowledge (2018)

A Figura 1-2 apresenta o número de publicações sobre o FMEA, nos últimos vinte e oito anos, a partir de 1990. De acordo com os dados, é possível analisar que houve um forte crescimento no número total de publicações sobre o tema, do qual pode-se destacar um aumento recorde registrado no ano de 2017.

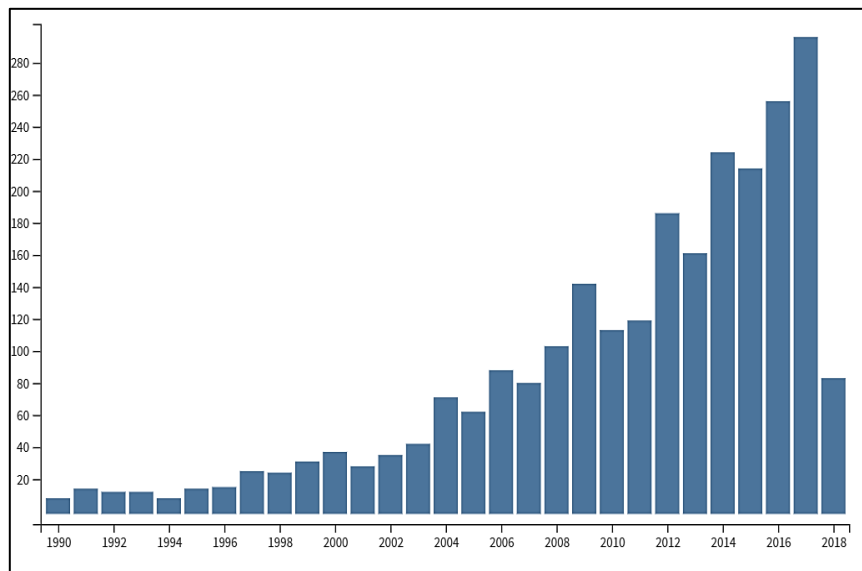


Figura 1-2 Número de publicações por ano sobre o FMEA
 Fonte: adaptado de Web of Knowledge (2018)

O número de aplicações e publicações sobre o FMEA é consideravelmente expressivo. De maneira geral, as Figura 1-1 e Figura 1-2 exibem uma tendência crescente de interesse da comunidade acadêmica e industrial em relação à ferramenta, o que motiva o objeto de estudo desta Tese e a exploração deste tema.

Com base nestes dados, dos quais fora realizado um diagnóstico detalhado das publicações sobre o tema de pesquisa desta Tese, pode-se destacar que nenhuma das pesquisas criteriosamente analisadas, aplicou abordagem quantitativa ao FMEA. Este fato reforça o interesse e motiva o ineditismo do tema escolhido e que merece uma Tese.

Sendo assim, a partir destes dados, justifica-se o desdobramento desta pesquisa e pode-se concluir que os resultados deste projeto certamente contribuirão de maneira significativa para a literatura e para ciência.

1.2 O problema de pesquisa

No FMEA, após estabelecer-se os modos de falhas potenciais de risco, os parâmetros S, O e D, são avaliados através de uma escala ordinal, que varia, via de regra, de 1 a 10 ou de 1 a 5. Os

modos que têm as maiores pontuações de RPN serão priorizados em termos de risco (FRANCESCHINI E GALETTO, 2001; PENTTI, 2002; NEPAL *et al.*, 2008; ABDELGAWAD e FAYEK, 2010; ZAMMORI e GABBRIELLI, 2011). Cada um dos integrantes da equipe que esteja envolvido com o FMEA, atribui a nota que julgar mais pertinente, de acordo com a sua opinião, o que pode ser tendencioso e parcial, potencial de subjetividade da ferramenta.

Nesta pesquisa, destaca-se a importância e necessidade de discutir a subjetividade através da análise de concordância das opiniões dos especialistas que desenvolvem o FMEA. Principalmente, porque os resultados do FMEA estão diretamente ligados ao sucesso da priorização dos riscos e as ações que surgem desta avaliação, para tratar as causas destes problemas potenciais de maneira otimizada, no menor tempo e custo. Além disso, outro fator tão importante quanto ao relatado anteriormente, é a segurança dos funcionários e da própria empresa.

Portanto, nesta Tese, o FMEA foi problematizado para analisar criticamente se esta é uma ferramenta qualitativa que apresenta confiabilidade das avaliações submetidas dos índices de risco (S, O, D e RPN) pelos avaliadores, entre si (*within*) e entre os demais (*between*), investigando-se a subjetividade deste processo de atribuição de notas. Para isto, a metodologia adotada visa abordar quantitativamente casos de FMEA aplicados em cenários diversos, que foram inclusive aliados a outras ferramentas como métodos multicritérios e lógica Fuzzy.

Além disso, a revisão sistemática da literatura sobre o FMEA e a análise dos resultados da abordagem quantitativa, proporciona introduzir conceitos de estatística para sua validação e classificação de confiabilidade, bem como consolidar informações para desenvolver e estabelecer diretrizes com as melhores práticas para o FMEA, na qual propõe-se uma metodologia nova, o FMEA R&R.

1.3 Estrutura e o desenvolvimento da abordagem quantitativa ao FMEA

A abordagem quantitativa deste trabalho se deve ao fato de que todos os dados coletados a partir do FMEA foram quantificados e tratados estatisticamente através da análise do sistema de medição e suas ferramentas de análise de concordância, por meio da avaliação da Reprodutibilidade e Repetitividade no processo de atribuição das notas ao FMEA para a S, O, D e o RPN.

A Figura 1-3 apresenta a estrutura lógica e ilustra o funil de desenvolvimento desta pesquisa, cujo o escopo está dividido em duas partes, na qual a primeira se trata da abordagem quantitativa ao FMEA, onde é possível avaliar se existe a subjetividade no FMEA por meio do estudo dos casos. A segunda parte, na sequência da pesquisa, tem-se a análise crítica do FMEA e proposta de melhorias, através da proposição do FMEA R&R e sua validação em um caso real da indústria.

Para que fosse possível homogeneizar a inferência quanto ao nível de confiabilidade do FMEA, limitou-se a abordagem quantitativa nesta pesquisa a análise de quatro casos de tipos de FMEA, a fim de identificar as dificuldades desta ferramenta, tendenciosidade e avaliar o nível de concordância (*within e between*), bem como a subjetividade do processo de atribuição de notas durante as avaliações de cada um dos índices de prioridade de risco. Com posse deste diagnóstico, pode-se concluir diretamente sobre a confiabilidade desta ferramenta para a tomada de decisão.

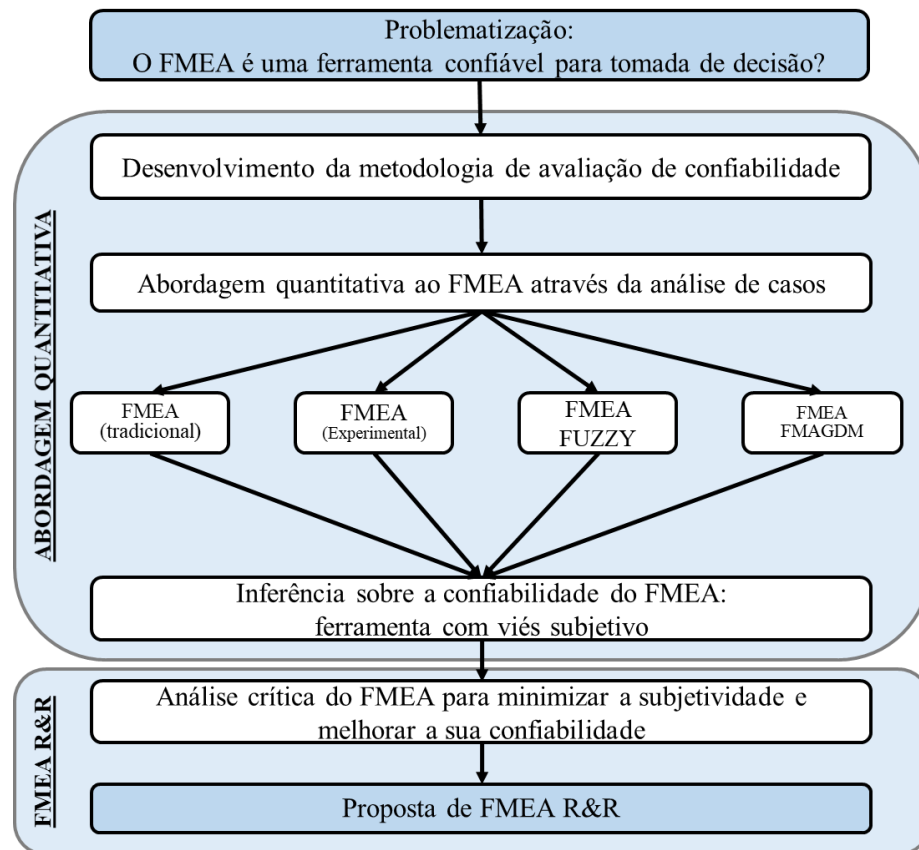


Figura 1-3 Escopo e estrutura de desenvolvimento da Tese

A partir dos resultados e conclusões da análise dos casos nesta pesquisa, pode-se observar e capturar oportunidades de melhoria em relação ao FMEA, na qual elaborou-se um roteiro

(*Roadmap*), contemplando diversos pontos críticos, para consolidar e estabelecer as diretrizes eficientes e necessárias para melhorar a confiabilidade da ferramenta.

1.4 Objetivos

Neste trabalho tem-se um objetivo geral e cinco objetivos específicos descritos nos próximos subcapítulos.

1.4.1 Objetivo Geral

Esta Tese tem como objetivo geral abordar quantitativamente o FMEA através da análise de concordância e investigar o viés de subjetividade presente no processo de avaliação dos índices de prioridade de riscos (S, O, D e RPN), a fim de desenvolver um estudo da confiabilidade dos seus resultados para tomada de decisão.

1.4.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, várias inferências podem ser realizadas e os seguintes objetivos específicos podem ser destacados:

- Propor uma matriz de confiabilidade para o FMEA com os índices de análise de concordância de Kendall e Kappa;
- Analisar a habilidade de Repetitividade e Reprodutibilidade das avaliações do FMEA, através de um caso experimental de FMEA;
- Analisar criticamente o FMEA estabelecendo-se quais os problemas que causam a subjetividade nesta ferramenta e impactam na sua confiabilidade;
- Propor um novo modelo FMEA (FMEA R&R) com o precedente de minimizar a subjetividade da ferramenta e melhorar a sua confiabilidade;
- Validar a eficiência do modelo FMEA R&R proposto, através da análise de um caso real da indústria.

1.5 Organização da Tese

A Tese é organizada e apresenta-se disposta em 6 Capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema de pesquisa, a justificativa, o problema de pesquisa, a estrutura de desenvolvimento da abordagem quantitativa e os objetivos.

O Capítulo 2 trata-se da revisão teórica da literatura sobre o FMEA e as ferramentas estatísticas que serão utilizadas nesta Tese. Este capítulo faz referências a livros, artigos de periódicos e eventos/congressos de ciência, contempla conceitos importantes sobre o FMEA e os documentos publicados ao longo dos anos, bem como apresenta os problemas e críticas relacionados, com uma visão geral sobre as tendências de ferramentas que são aliadas ao FMEA para aumentar o desempenho desta ferramenta. Além disso, a análise do sistema de medição (MSA) e GR&R e a análise de concordância por atributos e os indicadores de concordância escolhidos nesta pesquisa são detalhados em termos de formulação e interpretação.

O Capítulo 3 exhibe a metodologia na qual será desenvolvida a pesquisa deste documento, onde são apresentadas as principais considerações relacionadas ao método escolhido, a classificação do trabalho e as etapas que compõem a abordagem quantitativa ao FMEA.

O Capítulo 4 discorre sobre a análise dos quatro casos selecionados para realizar a abordagem quantitativa ao FMEA. Nesta seção, é aplicada a análise de concordância por atributos dos especialistas/avaliações e os casos são classificados em termos de concordância. Os resultados são discutidos para estabelecer o nível de subjetividade e confiabilidade do FMEA.

O Capítulo 5 discute quais são os problemas que causam a subjetividade do FMEA e impactam na confiabilidade dos seus resultados. Além disso, propõe-se um novo modelo de “FMEA R&R” e sua aplicação em um caso real da indústria, para validar a minimização da subjetividade do FMEA e verificar confiabilidade deste modelo para tomada de decisão.

O Capítulo 6 encerra este documento, apresentando as conclusões da pesquisa, a consideração final e sugestões para próximas pesquisas sobre o tema.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Considerações iniciais

O Capítulo 2 apresenta um estudo abrangente de pesquisas e publicações que envolvem o objeto de estudo FMEA e as ferramentas necessárias para o desenvolvimento dessa pesquisa. Para tanto, esta Tese faz referência a publicações da literatura nacional e internacional, com relevantes obras que compõem este documento e, é importante destacar, a revisão da literatura de Liu, Liu, e Liu de 2013, continuação da revisão e discussão do trabalho de dissertação de Dalosto (2015) e a mais recente revisão periódica disponível sobre o FMEA (até a presente data deste documento) de Spreafico, Russo e Caterina Rizzi (2017). Além destas referências principais, foram analisados e citados artigos de conceituados periódicos, livros de autores importantes da própria área e correlatas, revistas, normas, dissertações e teses.

Sobre a estrutura desta seção, primeiramente foram apresentadas a fundamentação teórica utilizada para embasar este trabalho com os conceitos e definições sobre o FMEA. As seções seguintes discorrem primeiramente sobre a análise do sistema de medição, demonstrando os conceitos relacionados com estudos de Reprodutividade e Repetitividade. Na sequência, tem-se as considerações sobre a análise de concordância por atributos e os indicadores de concordância utilizados para investigar a confiabilidade do FMEA durante o processo de atribuição de suas notas.

2.2 A Análise de risco e falhas potenciais

O processo de análise de risco e falhas potenciais tem grande importância no desenvolvimento e acompanhamento de projetos (DALOSTO, 2015). Pode ser entendida como o uso de técnicas sistemáticas (métodos) durante o Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) que empregam conhecimentos tácitos de engenharia para prever possíveis maneiras segundo as quais poderiam ocorrer falhas tanto do projeto do produto (design), quanto de seu processo de fabricação (LAURENTI, 2010). Segundo a Norma NBR 54621994, tem-se que:

A falha é considerada o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida. É a redução total ou parcial da capacidade de uma peça, componente ou máquina de desempenhar a sua função durante um período de tempo, quando

o item deverá ser reparado ou substituído. A falha leva o item a um estado de indisponibilidade.

A detecção das falhas e conseqüentemente dos riscos em fase inicial tem impacto financeiro significativo nas companhias (DASS, SRIVASTAVA e SINGH, 1993; STENBECK e SVENSSON, 2004).

O custo da modificação de um projeto é muitas vezes fator decisivo para o sucesso competitivo da empresa no mercado e até mesmo para sua sobrevivência, já que almejam produzir mais com menos recursos. O momento ideal para tomar decisões é a fase inicial e deve ser realizada da maneira mais rápida possível para garantir o projeto e não comprometer os interesses da empresa, e em especial, a segurança dos funcionários.

2.3 Procedimentos de análise de falhas potenciais

Devido as grandes necessidades de se detectar falhas de projetos explanados no Capítulo anterior, existem diversas metodologias para análise de causas potenciais de risco. Os métodos buscam identificar as causas dos defeitos futuro de maneira sistemática, a fim de reduzir tempo e custo de produção, bem como investimentos (LAURENTI, 2010).

Adaptado da obra de Laurenti (2010), tem-se que, as metodologias mais empregadas para a análise de falhas potenciais são as ferramentas qualitativas:

- FMEA;
- DRBFM (*Design Review Based on Failure Mode*) – Projeto de Revisão baseado nos modos de falha;
- FTA (*Fault Tree Analysis*) - Análise tipo Árvore de Falhas;
- QFD (*Quality Function Deployment*) – Desdobramento das ferramentas da qualidade;
- Diagrama de Causa e Efeito.

Em suma estas metodologias tem o objetivo de identificar melhorias no projeto do produto e do processo de maneira sistemática e é largamente utilizada em instituições de diversos países (CARPITELLA *et al.*, 2018; TIAN, WANG E ZHANG, 2018).

Entretanto, muitos autores como Hawkins e Woollons (1998), Stamatis (1995), e Stone, Tumer e Stock (2005) afirmam em seus trabalhos que, o método mais utilizado na indústria para

antecipar falhas do produto e do seu processo de fabricação é o FMEA. O FMEA é indispensável para o desenvolvimento, análise e acompanhamento dos produtos e processos durante o PDP (ROZENFELD *et al.*, 2006).

Com toda essa relevância e sua importância para as organizações, bem como a larga e crescente empregabilidade, o FMEA se destaca e, por isso, é o objeto de estudo dessa pesquisa.

2.4 FMEA

2.4.1 O que é o FMEA

Segundo a ABNT, na norma NBR 5462 (1994), se entende como sendo a Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (AMFE). Quando é utilizado para a análise de criticidade também pode ser referido como a Análise de Criticidade do Modo e Efeitos de Falha, identificado por FMECA (LIU, LIU e LIU, 2013). Nesta Tese, adotou-se o termo FMEA, já que é a forma mais popular no âmbito acadêmico e industrial.

O FMEA é uma ferramenta muito poderosa e eficaz que é largamente utilizada em projetos de engenharia para analisar possíveis modos de falha potencial e falhas já existentes (XIAO *et al.*, 2011) e fornece informações necessárias sobre o projeto para a tomada de decisões e gestão do risco (LAURENTI, 2010). A utilização do FMEA visa proporcionar diretrizes confiáveis, com maior qualidade e segurança reforçada nas organizações, assim como pode ser empregado para avaliar e otimizar os planos de manutenção (ARABIAN-HOSEYNABADI, ORAEE, e TAVNER, 2010). A análise através do FMEA é a melhor maneira para examinar a confiabilidade na fase de concepção e também é útil para diagnosticar projetos de melhorias ao longo do tempo para tecnologias que estão sob testes (ARABIAN-HOSEYNABADI, ORAEE, e TAVNER, 2010).

O FMEA também é uma ferramenta que exerce contribuição à análise financeira de projetos e processos. Pode-se destacar que uma das melhores características do FMEA é permitir tomar decisões antes que ocorra o fracasso, em outras palavras, esta ferramenta permite antecipar as falhas principalmente nas fases iniciais de projeto (ASME, 2001; BELZER, 2001; LACITY *et al.*, 2008). Esta detecção precoce é muito importante para a saúde financeira das organizações, porque normalmente muito dinheiro está envolvido nas etapas de produção e, ao oposto, a fase de planejamento é o momento mais apropriado para ajustes com baixo impacto em orçamentos.

Além disso, o FMEA pode ser utilizado como parte de uma análise qualitativa ou de uma análise semi-quantitativa, pois essa ferramenta busca identificar componentes críticos cuja falha ocasiona acidentes, ferimentos ou danos ao processo e operadores (Pillay e Wang 2003).

Então, neste Capítulo, pode-se observar o que é o FMEA e notar que é uma ferramenta de grande valia para as organizações. Através da sua utilização é possível identificar os riscos potenciais, causas de falhas e seus efeitos e ainda priorizá-los, bem como realizar mudanças e reformas de maneira simples e com baixo custo.

2.4.2 Histórico do FMEA

Segundo Pentti e Atte (2002), a origem do FMEA pode ter base no método que foi desenvolvido e documentado pela primeira vez no procedimento MIL-P-1629, em 1949 pelo exército dos Estados Unidos. Nessa linha de desenvolvimento, o FMEA oficialmente foi criado como uma metodologia de projeto formal na década de 60 pela NASA (BOWLES e PELÁEZ, 1995). O motivo para seu desenvolvimento, em 1963, era auxiliar as equipes a cumprir os seus requisitos de confiabilidade durante a corrida espacial do projeto Apollo (PUENTE et al., 2002; JOHNSON e KHAN, 2003; CLARKE, 2005; BERTSCHE, 2008; MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009; BAHRAMI, BAZZAZ e SAJJADI, 2012).

A introdução do FMEA à indústria é controversa segundo alguns autores. De acordo com a obra de Bahrami, Bazzaz e Sajjadi (2012), em 1970, os conceitos sobre o FMEA foram usados em instalações nucleares de energia. No ano de 1977 foi implementado na indústria automotiva através da indústria Citroen e alguns anos depois, a concorrente Peugeot também passou a utilizar a técnica a partir de 1980. Porém, segundo Clarke (2005), apenas em 1975 o FMEA foi usado no setor nuclear e em 1978 a Ford Company foi a primeira empresa automotiva a integrar o FMEA em seu conceito de garantia da qualidade.

Contudo, o mais importante é que a ferramenta ganhou destaque entre as companhias mundiais e no início da década de 80 as empresas automotivas que formam a AIAG (*Automotive Industry Action Group*) incorporaram formalmente o FMEA, por meio da norma QS-9000 (atual ISO/TS 16949), em seus processos de desenvolvimento de produtos.

De acordo com a pesquisa na literatura, o FMEA é aplicado em uma variedade de áreas, tais como: serviços (SPATH, 2003; DUWE, FUCHS e HANSEN-FLASCHEN, 2005; MONTI et al., 2005; CHIOZZA e PONZETTI, 2009; FORD et al., 2009), química e petroquímica

(GUIMARÃES e LAPA, 2004; THIVEL, BULTEL e DELPECH, 2008), alimentos (SCIPIONI et al., 2002; SCOTT, WILCOCK e KANETKAR, 2009; TSAROUHAS, ARVANITTOYANNIS e AMPATZIS, 2009; TSAROUHAS, ARVANITTOYANNIS e VARZAKAS, 2009), desenvolvimento de software (BRAUN et al., 2009; GÖNCZY et al., 2009; KOH e SEONG, 2009), administrativo (RHEE e ISHII, 2003; MILAZZO et al., 2009) e etc.

O FMEA tem sido amplamente utilizado como uma reconhecida técnica para a segurança do sistema e análise de confiabilidade de produtos e processos em uma ampla gama de indústrias – particularmente, a aeroespacial, energia nuclear, automotiva e setor médico (EBELING, 2000; GILCHRIST, 1993; O'CONNOR, 2000).

Devido a sua importância contemporânea, o FMEA foi incorporado como norma entre os manuais elaborados pela AIAG, cuja a versão é “FMEA – Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (4ª edição, de 2008)”. Todos os fornecedores da Crysler, Ford e GM, para serem homologados como fornecedores, devem seguir os requisitos dessa norma AIAG, que adota como padrão, o FMEA como método de análise de riscos potenciais.

2.4.3 Escopo e objetivos do FMEA

O escopo do FMEA é identificar os riscos de modos de falha, através de avaliação e priorização para tomada de ações corretivas apropriadas. Esses princípios também são defendidos por Liu, Liu e Liu (2013), que discorrem que os resultados produzidos com o desenvolvimento e a análise do FMEA auxiliam os analistas a identificar e corrigir os modos de falha que têm um efeito negativo sobre o sistema e melhorar seu desempenho durante as fases de concepção e produção.

Segundo Pillay e Wang (2003), o FMEA tem como objetivo:

- Avaliar os efeitos de falhas de componentes sobre o desempenho do sistema;
- Identificar aqueles componentes que são críticos para a segurança;
- Discutir melhorias do sistema ou mudanças administrativas para melhorar a confiabilidade e a segurança do sistema.

A composição de Sant`anna e Junior (2010) sobre os impactos que a aplicação do FMEA pode proporcionar, também podem ser enumerados como objetivos tangíveis dessa ferramenta:

- Uma forma sistemática de catalogar informações sobre as falhas dos produtos ou processos;
- Melhorar o conhecimento dos problemas nos produtos ou processos;
- Conduzir a ações de melhoria no projeto do produto ou processo, baseadas em dados e devidamente monitoradas (melhoria contínua);
- Diminuir custos por meio da prevenção de ocorrência de falhas;
- Benefício de incorporar dentro da organização a atitude de prevenção de falhas, a atitude de cooperação e trabalho em equipe, bem como a preocupação com a satisfação dos clientes.

Além disso, os principais objetivos relacionados à segurança que a análise do FMEA proporciona estão detalhados no artigo de Pillay e Wang (2003):

- Análise do sistema para determinar os efeitos de falhas de componentes sobre o desempenho e a segurança do sistema;
- Identificação de componentes que são críticos para a segurança (localização da origem da falha e de componentes comprometedores ao funcionamento do sistema, que possam resultar em ferimentos, danos à propriedade ou outras perdas);
- Redesenhar o sistema para melhorar a sua confiabilidade e segurança;
- Fornecer mais informação para melhorar as rotinas de manutenção e reduzir a probabilidade de falhas dos componentes.

De uma maneira ampla, pode-se concluir que os principais objetivos do FMEA são identificar os modos de falha potenciais, avaliar as causas e os efeitos de diferentes falhas e seus componentes, assim como determinar o que poderia eliminar ou reduzir a chance de fracasso visando a segurança do sistema e dos operadores.

2.4.4 Tipos de FMEA

De acordo com o trabalho publicado por Stamatis, em 1995, referência para muitos autores, há quatro tipos de FMEA. No trabalho de Sant`anna e Junior (2010) e Laurenti (2010) estes quatro tipos estão bem detalhados e foram adaptados, como segue:

- FMEA de sistema – utilizado para analisar sistemas e subsistemas no início do desenvolvimento do conceito e do projeto (design). Um FMEA de sistema foca nos modos de falhas potenciais, causados por deficiências do sistema, ou das funções do sistema. Nas análises são incluídas interações entre sistemas e entre elementos (subsistemas) de um sistema;
- FMEA de projeto – usado para analisar produtos antes que eles sejam liberados para manufatura. O FMEA de projeto foca os modos potenciais de falha causados pelas deficiências do projeto;
- FMEA de processo – usado para analisar processos de fabricação e montagem. Um FMEA é focado em modos de falha causados por deficiências de processo de fabricação ou montagem;
- FMEA de serviço – usado para analisar serviços antes que cheguem ao consumidor. Um FMEA de serviço foca em modos de falha (tarefas, erros ou enganos) causados por deficiências do sistema ou do processo.

A escolha do tipo de FMEA depende do objeto de estudo e dos benefícios que cada um proporciona, como mostra o Quadro 2-1 Relevância do tipo de FMEA.

Quadro 2-1 Relevância do tipo de FMEA

	Sistema	Projeto	Processo	Serviço
Os benefícios de se utilizar um FMEA	Ajuda a selecionar a melhor alternativa de projeto de sistema.	Estabelece uma prioridade de ações de melhoria de projeto.		
	Ajuda a determinar redundância.	Fornecer informações para ajudar através da verificação do projeto do produto e testes	Identifica as deficiências no processo e oferece um plano de ações corretivas.	Auxilia nas análises dos fluxos de trabalho.
	Ajuda na definição da base para os procedimentos de diagnóstico em nível de sistema.	Ajuda a identificar as características críticas ou significativas.	Identifica as características críticas e/ou significativas e ajuda o desenvolvimento dos planos de controle.	Auxilia nas análises dos sistemas e/ou processos
	Aumenta a probabilidade de que os problemas potenciais sejam considerados.	Auxilia na avaliação dos requerimentos de projeto e alternativas.	Estabelece uma prioridade de ações corretivas.	Identifica as deficiências das tarefas.
	Identificam as falhas potenciais do sistema e sua interação com outros sistemas ou subsistemas.	Ajuda a identificar e eliminar os problemas potenciais de segurança.	Auxilia na análise dos processos de manufatura e montagem.	Identifica as tarefas críticas ou significativas e ajuda no desenvolvimento dos planos de controle.
		Ajuda a identificar antecipadamente as falhas, nas fases de desenvolvimento do produto.		Estabelece uma prioridade para as ações de melhoria.
		<u>Documenta as razões para as mudanças.</u>		

Fonte: adaptado de ROZENFELD *et al.* (2006)

Além dos tipos mencionados, atualmente pode-se destacar o FMEA de produto, que se derivou do FMEA de processo / projeto, uma vez que é voltado somente para a análise das falhas potenciais e propostas de ações de melhoria, bem como ocorram falhas no projeto ou do processo do produto específico. Assim, este tipo de FMEA é empregado para análise de risco durante o planejamento de novos itens, precedente à fase de implementação, processo e produção.

Portanto, consolidando-se todos os tipos de FMEA, tem-se disponível cinco modelos de FMEA: Produto, Sistema, Projeto, Processo e Serviço.

2.4.5 Estrutura do FMEA

A estrutura básica de desenvolvimento do FMEA compreende quatro etapas: planejamento, análise das potenciais falhas, avaliação dos riscos e melhoria (SANT'ANNA e JUNIOR, 2010). Esta ferramenta deve ser desenvolvida e aplicada por um grupo multifuncional de três a seis pessoas, que analisam e identificam o processo e as suas funções, os tipos de falhas que podem acontecer, os efeitos e as possíveis causas desta falha (AIAG, 2008). Neste manual, aponta-se que o tamanho da equipe depende da complexidade do item e do porte da organização. Porém, se a equipe contiver mais de sete ou oito membros, o dinamismo das discussões do time poderia ser prejudicado por falta de integração entre os seus membros, bem como levar a inconsistências durante a realização do FMEA (LEVIN e KALAL, 2003; BERTSCHE, 2008).

O time deve conter os representantes das áreas envolvidas com o projeto que se deseja analisar, isto é, o pessoal que compõe a equipe deve representar áreas como: manutenção, gerência, financeira, projetista, analistas, engenheiros de processo e encarregados. Sobretudo, o time formado deve ter experiência para analisar todos os fatores a serem considerados durante o desenvolvimento do FMEA (MONTI et al., 2005; CHIOZZA e PONZETTI, 2009; FORD et al., 2009; THIVEL, BULTEL e DELPECH, 2008; SCIPIONI et al., 2002; SCOTT, WILCOCK e KANETKAR, 2009; TSAROUHAS, ARVANITTOYANNIS e AMPATZIS, 2009; BRAUN et al., 2009; GÖNCZY et al., 2009; MILAZZO et al., 2009; XIAO et al., 2011).

A realização do FMEA depende da habilidade individual dos seus executores e do conhecimento geral que o time pode proporcionar. Essa característica é necessária, uma vez que, a análise dos itens a falhar se baseiam na experiência, no conhecimento histórico e em assuntos passados sobre como o produto ou processo tem evoluído. A importância da ferramenta e sua

qualidade em identificar e priorizar os riscos, está ligada diretamente com o consenso do desempenho em conjunto dos especialistas.

A posteriori, são avaliados os riscos de cada causa de falha por meio dos índices de risco e, através desta avaliação, são tomadas as medidas necessárias para reduzir os riscos do processo, no sentido de torná-lo mais confiável, estável e seguro para o processo e funcionários. Todos estes registros são realizados no Formulário FMEA, detalhado no próximo Capítulo.

2.4.5.1 O formulário de desenvolvimento do FMEA

O desenvolvimento do formulário do FMEA começa com a análise de todos os sistemas passo a passo, examinando as funções do sistema e desdobrando-as em subsistemas. No Quadro 2-2, utilizou-se como base as etapas sugeridas por Modarres (1993), que orientam como construir um formulário FMEA e exibe os elementos do sistema, identificados como modo de falha que posteriormente devem ser classificados de acordo com os índices de risco.

Quadro 2-2 Etapas de elaboração do Formulário FMEA

<p>Descrever o sistema com a operação, inter-relação e interdependência das entidades funcionais do sistema, que deve ser decomposto em mais componentes básicos. Um diagrama de sistema pode auxiliar.</p>
<p>Identificar os modos de falha e as causas: a maneira de fracasso da função, subsistema ou componente deve ser definido claramente.</p>
<p>Examinar: efeito (s) de falha: as consequências de cada modo de falha devem ser cuidadosamente examinadas e registradas.</p>

Fonte: adaptado de Modarres (1993)

Mais informações e procedimentos detalhados sobre como realizar o formulário FMEA e suas várias aplicações nas diferentes indústrias podem ser vistos em: Stamatis (1995), Sankar e Prabhu (2001), Bowles e Peláez (1995), Moss e Woodhouse (1999), Xu et al. (2002), Zafiroopoulos e Dialynas (2005), Chin et al. (2008), Nepal et al. (2008), Puente et al. (2002), Pillay e Wang (2003), Yang et al. (2008) e Gargama e Chaturvedi (2011).

Na Figura 2-1 é apresentado um formulário FMEA genérico proposto pela AIAG (2008) e por Bertsche (2008).

FMEA																		
<input type="checkbox"/> FMEA de Produto <input type="checkbox"/> Sistema <input type="checkbox"/> Sub-sistema <input type="checkbox"/> Componente		<input type="checkbox"/> FMEA de Processo		Responsável projeto			Responsável FMEA			FMEA No								
Membros do Time				Preparado por			Data			Aprovado por			Data					
				Nome do produto			Código											
Item / Função	Modos de falha potencial	Efeitos potenciais	S	Causas potenciais	Controle atual de projeto				RPN	Ações recomendadas	Responsáveis e data alvo de finalização	Resultado das ações						
					Prevenção	O	Detecção	D				Ações implementadas	S	O	D	Novo RPN		

Busca por todos os possíveis/potenciais modos de falha →
Busca por todos os possíveis/potenciais efeitos de falha →
Busca por todas as possíveis/potenciais causas de falha →
Definição/determinação de todos os controles existentes →
Proposição de soluções e ações de redução de risco →
Registro e avaliação dos resultados

FMEA de projeto
 Nome do componente e sua sua função
FMEA de processo
 Nome da operação e sua sua função

Figura 2-1 Formulário FMEA genérico
 Fonte: adaptado do manual da AIAG (2008) e Bertsche (2008)

2.4.5.2 Índices de prioridade de Risco

Os índices de prioridade de risco são parâmetros que permitem classificar os modos de falha e priorizá-los. São os fatores que regem o FMEA independentemente do tipo de FMEA que se está realizando (processo, sistema, etc.), da empresa, setor ou equipe.

Ao aplicar o FMEA, cada componente é examinado para identificar essas falhas e essas três medidas são consideradas (Maddox, 2005):

- Severidade: é o impacto ou a gravidade da falha;
- Ocorrência: é a probabilidade de ocorrência de falha;

- Detecção: é a capacidade para detectar a falha antes que ela ocorra.

A Severidade se refere à magnitude do efeito que o item avaliado tem sobre o sistema se falhar. Quanto mais grave é a consequência, maior o valor da severidade a ser atribuída ao efeito. A Ocorrência refere-se à frequência com que uma causa é susceptível de ocorrer, descrito de forma qualitativa ou a partir de uma tabela quantitativa com as vezes que a falha ocorre por hora, dia ou semana. Isso não é na forma de um período de tempo, mas sim em termos de quão remoto ou ocasional o erro ocorre. A Detecção refere-se à probabilidade de detectar a causa raiz antes de ocorrer ou imediatamente após o ocorrido.

Através destes índices, o objetivo é definir a função ou característica de um determinado serviço (ARAÚJO, 2008). Os fatores de Severidade, Ocorrência e Detecção são individualmente avaliados utilizando uma escala numérica, tipicamente variando de 1 a 10 (LAURENTI, 2010; XIAO et al., 2011; WANG et al., 2009; LIU, LIU e LIU, 2013). O valor 1 representa severidade mínima, baixa ocorrência, e detecção muito provável. O valor oposto (10) representa uma avaliação extremamente negativa e baixa confiabilidade do produto.

2.4.5.2.1 RPN – Número de Prioridade de Risco

No FMEA tradicional, a priorização dos modos de falha é determinada através do Número de Prioridade de Risco – RPN. Este número é a referência de grandeza para a priorização de riscos e tomada de decisão do objeto de aplicação. O RPN é calculado através do produto da Ocorrência (O), Severidade (S) e de Detecção (D) de uma falha (LIU et al., 2011; LIU, LIU e LIU, 2013; BAHRAMI, BAZZAZ e SAJJADI, 2012; LAURENTI, ROZENFELD e FRANIECK, 2012; ARABIAN-HOSEYNABADI, ORAEE e TAVNER, 2010), ou seja, esse número é obtido através da Equação (1):

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

Assim sendo, o cálculo do RPN permite a análise do sistema em questão e, quanto maior o valor para o RPN, significa que o modo de falha está com mais risco no projeto e deve ser priorizado (ARABIAN-HOSEYNABADI, ORAEE e TAVNER, 2010). Em outras palavras, os modos com valores mais altos para RPN são enfatizados (HELVACIOGLU e OZEN, 2014).

2.4.6 Pesquisas sobre o FMEA

Conforme relatado, o FMEA é uma ferramenta tendência que tem sido largamente praticada em diversas áreas. Além dessa aplicabilidade, tem-se desenvolvido muitas pesquisas sobre o tema, como apresenta a Figura 2-2 com as principais publicações sobre o FMEA, com base na revisão de mais de 220 artigos científicos e 109 patentes, de 1978 até o ano de 2017, de Spreafico, Russo e Caterina Rizzi (2017).

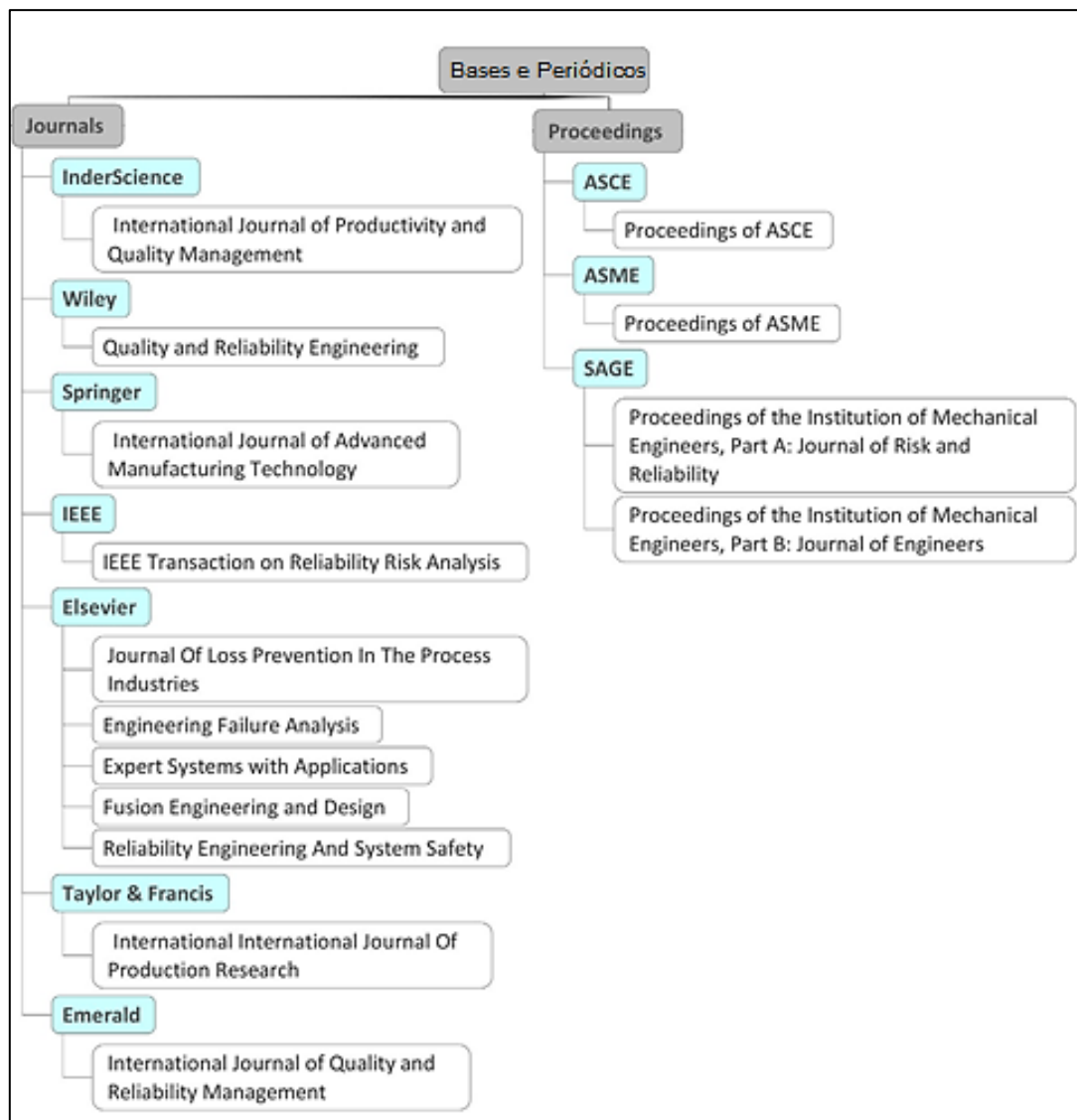


Figura 2-2 Fonte de dados do trabalho de Spreafico, Russo e Caterina Rizzi
Fonte: Spreafico, Russo e Caterina Rizzi (2017)

Na Figura 2-3, Spreafico, Russo e Caterina Rizzi (2017) levantam as disposições de aplicação sobre o FMEA nos últimos anos, consolidando o número de publicações e confrontando os artigos versus patentes, isto é, academia versus indústria. As patentes relacionadas ao FMEA

demonstram a relevância deste instrumento para análise de riscos potenciais na prática da indústria, apesar do pequeno número comparado aos artigos publicados na academia.

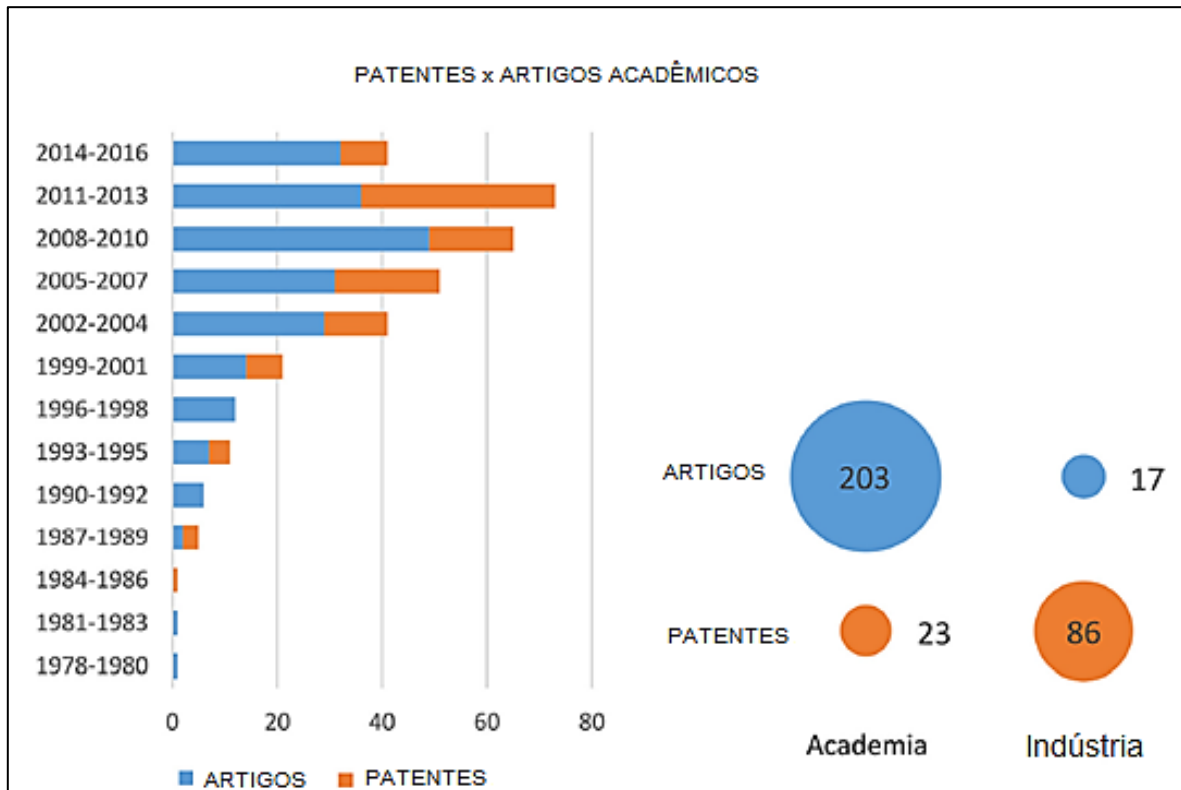


Figura 2-3 Publicações sobre FMEA: artigos vs. patentes e academia vs. indústria.

Fonte: Spreafico, Russo e Caterina Rizzi (2017)

Por outro lado, embora toda a empregabilidade do FMEA na indústria e academia, esta ferramenta apresenta alguns problemas, os quais foram apontados no trabalho de revisão da literatura de Liu, Liu e Liu (2013). Nesse trabalho, os autores reuniram as deficiências mais exploradas e discutidas em 75 artigos desde o ano de 1992 até 2012 e estão apresentadas no Quadros 2-3.

De todas as críticas ao FMEA relatadas nestes quadros, vale a pena salientar que a maioria delas é sobre o RPN e suas variações de resultado, aonde grande parte dos métodos utiliza o valor do RPN para avaliar o risco do objeto em estudo. Entretanto, a metodologia convencional RPN não considera o parâmetro da relação entre componentes de um sistema no que diz respeito ao seu tipo e gravidade, ou seja, não relativiza os diferentes pesos que a severidade, ocorrência e detecção possam ter. Este fato tem sido a maior crítica, no qual dos 75 artigos pesquisados, 45 apontam como a principal deficiência. Essa grande variedade de críticas pode ser observada no Quadro 2-4.

Quadro 2-3 As principais deficiências do FMEA vs. Autores

Deficiências	Autores	Total artigos
A importância relativa entre O, S e D não é levada em consideração. As suas implicações de risco escondidos podem ser totalmente diferentes.	Wang et al. (2009b), Chin et al. (2009a, 2009b), Liu et al. (2011, 2012), Gargama e Chaturvedi (2011), Kutlu e Ekmekçioğ̃ lu (2012), Zhang e Chu (2011), Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003a, 2003b), Sharma et al. (2005, 2007a, 2007b, 2007c, 2007d, 2008a, 2008b, 2008c), Sharma e Sharma (2012, 2010), Chang e Cheng (2011, 2010), Chang e Wen (2010), Chang et al. (2010, 1999, 2001), Seyed-Hosseini et al. (2006), Tay e Lim (2010, 2006a), Keskin e Zkan (2009), Pillay e Wang (2003), Bowles e Peláez (1995), von Ahsen (2008), Carmignani (2009), Xiao et al. (2011), Franceschini e Galetto (2001), Nepal et al. (2008), Sankar e Prabhu (2001), Zammori e Gabbrielli (2011), Abdelgawad e Fayek (2010), Shahin (2004), Puente et al. (2002), Garcia et al. (2005), Chang e Sun (2009)	45
Diferentes combinações de O, S e D podem produzir exatamente o mesmo valor de RPN. Pois, o produto SxOxD tem muitas combinações que resultam no mesmo produto.	Wang et al. (2009b), Chin et al. (2009a, 2009b), Liu et al. (2011, 2012), Gargama e Chaturvedi (2011), Kutlu e Ekmekçioğ̃ lu (2012), Zhang e Chu (2011), Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003b), Sharma et al. (2005, 2007a, 2007b, 2007c, 2007d, 2008a, 2008b, 2008c), Sharma e Sharma (2012, 2010), Tay e Lim (2010, 2006a), Keskin e Zkan (2009), Pillay e Wang (2003), Chen (2007), von Ahsen (2008), Carmignani (2009), Franceschini e Galetto (2001), Chang et al. (1999, 2001), Shahin (2004), Puente et al. (2002), Chang e Sun (2009)	33
Os três índices de risco são difíceis de ser precisamente avaliadas	Wang et al. (2009b), Chin et al. (2009a, 2009b), Liu et al. (2011, 2012), Gargama e Chaturvedi (2011), Kutlu e Ekmekçioğ̃ lu (2012), Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003a, 2003b), Sharma et al. (2005), Chang et al. (2010), Xu et al. (2002), Braglia (2000), Yang et al. (2011), Chen e Ko (2009a, 2009b), Zammori e Gabbrielli (2011), Abdelgawad e Fayek (2010), Garcia et al. (2005)	21
A fórmula matemática para o cálculo RPN é questionável e discutível, pois não considera o peso dos fatores de risco	Chin et al. (2009a, 2009b), Liu et al. (2011, 2012), Gargama e Chaturvedi (2011), Kutlu e Ekmekçioğ̃ lu (2012), Braglia et al. (2003a, 2003b), Geum et al. (2011), Chang et al. (1999, 2001), Puente et al. (2002), Ben-Daya e Raouf (1996), Gilchrist (1993)	14
A conversão de pontuações é diferente para os três fatores de risco	Chin et al. (2009b), Liu et al. (2011), Braglia et al. (2003a, 2003b), Chen (2007), von Ahsen (2008), Carmignani (2009), Chang et al. (1999, 2001), Sankar e Prabhu (2001), Puente et al. (2002), Ben-Daya e Raouf (1996), Gilchrist (1993)	13
O RPN não pode ser usado para medir a eficácia das ações corretivas	Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003b, 2007), Pillay e Wang (2003), Chen (2007), Carmignani (2009), Chang et al. (1999, 2001), Shahin (2004), Puente et al. (2002), Ben-Daya e Raouf (1996), Gilchrist (1993)	12
RPN's não são números contínuos. Isso acarreta em discrepâncias por ser um número discreto	Liu et al. (2012), Chang e Cheng (2011, 2010), Chang et al. (2010), Chang (2009), Keskin e Zkan (2009), Carmignani (2009), Franceschini e Galetto (2001), Garcia et al. (2005), Chang e Sun (2009)	10
As interdependências entre os vários modos de	Xu et al. (2002), Chin et al. (2008), Braglia et al. (2007), von Ahsen (2008), Carmignani (2009), Nepal et al. (2008), Zammori e Gabbrielli (2011), Shahin (2004),	10
A forma matemática adotada para o cálculo do RPN é muito sensível a variações na avaliação dos fatores de risco	Chin et al. (2009b), Liu et al. (2011, 2012), Gargama e Chaturvedi (2011), Kutlu e Ekmekçioğ̃ lu (2012), Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003a, 2003b), Chang (2009)	9
Os elementos RPN têm muitos números duplicados	Gargama e Chaturvedi (2011), Chang e Cheng (2011, 2010), Chang et al. (2010), Chang (2009), Seyed-Hosseini et al. (2006), Sankar e Prabhu (2001), Garcia et al. (2005), Chang e Sun (2009)	9
A RPN considera apenas três fatores de risco, principalmente em termos de segurança	Chin et al. (2009b), Liu et al. (2011), Yang et al. (2008), Braglia et al. (2003a, 2003b), Chang e Cheng (2010), Braglia (2000), Carmignani (2009), Zammori e Gabbrielli (2011)	9

Fonte: adaptado de Liu, Liu, e Liu (2013)

Na revisão sobre o FMEA de Spreafico, Russo e Caterina Rizzi (2017), diversos problemas foram pesquisados e catalogados. Estas considerações e problemas foram compilados e são apresentados nos Quadro 2-4, Quadro 2-5 e o Quadro 2-6, com publicações até o ano de 2017.

Quadro 2-4 Problemas relacionados à aplicabilidade do FMEA

Problema e comentário	Academia	Indústria	Total
Subjetividade: nível de especialização e conhecimento dos usuários para avaliar o FMEA	18	3	21
Oneroso: longo tempo para desenvolver e analisar os resultados do FMEA	11	5	16
Integração de com outras ferramentas: falta de integração com banco de dados históricos que possa relacionar causas e efeitos, bem como softwares	12	3	15
Aplicação tardia: resultados limitados causados pelo momento errado de aplicação da metodologia, normalmente demasiadamente tarde	6	3	9
Nível de detalhes e informações: informações simples e/ou pobres para a seleção e identificação de riscos	5	4	9
Avaliadores: baixo nível de preparação dos executores, falta de envolvimento dos membros da equipe, bem como falta de comunicação pessoal	3	4	7
Analisar sistemas complexos: dificuldade para gerenciar sistemas complexos com vários componentes que interagem mutuamente	4	1	5
Muito caro: o projeto pode ser muito caro em termos de envolvimento recursos humanos e métodos de gestão	3	1	4
Total	62	24	86

Fonte: adaptado de Spreafico, Russo e Caterina Rizzi (2017)

Quadro 2-5 Problemas relacionados relação de causa e efeito

Problema e comentário	Academia	Indústria	Total
Identificação de efeitos correlacionados: não identificação de efeitos secundários em cadeias de causa e efeito, especialmente para o meio ambiente e a saúde	12	4	16
Modelagem da cadeia de causa e efeitos: falta de modelos adequados (por exemplo, árvore de problemas) para descrever a cadeia de causa e efeito	8	2	10
Nível de detalhamento para descrição dos efeitos: descrição dos efeitos sem detalhes e superficial	3	3	6
Descrição do modo de falha: falta de diretrizes para distinguir entre modos de falha e efeitos	5	1	6
Total	28	10	38

Fonte: adaptado de Spreafico, Russo e Caterina Rizzi (2017)

Quadro 2-6 Problemas relacionados à análise de risco

<u>Problema e comentário</u>	<u>Academia</u>	<u>Indústria</u>	<u>Total</u>
Subjetividade: Definições ambíguas levando à subjetividade durante o risco avaliação	23	4	27
Medição de risco: falta de critérios específicos e quantificação do risco (por exemplo, critérios económicos)	10	0	10
Confiabilidade de resultados: avaliação de risco inconsistente para tomada de decisão e resolução de problemas	8	0	8
Total	41	4	45

Fonte: adaptado de Spreafico, Russo e Caterina Rizzi (2017)

Com base em todas estas publicações, é possível notar que existe um grande número de pesquisadores envolvidos com o FMEA e também diversas aplicações na indústria. O interesse e reconhecimento deste instrumento, conforme as pesquisas apresentadas neste Capítulo, denotam os pontos fortes do FMEA, assim como suas fraquezas que foram regularmente criticadas especialmente ao longo dos últimos 20 anos.

Em relação as críticas, pode-se observar, que um dos maiores pontos fracos é a subjetividade, como já mencionado ao longo desta Tese. Mais uma vez, reforçamos o ineditismo desta Tese com a abordagem quantitativa e a sua contribuição à literatura, pois este trabalho visa inferir estatisticamente sobre a subjetividade e a confiabilidade do FMEA.

O próximo Capítulo 2.4.7 disserta, especialmente, sobre a subjetividade do FMEA.

2.4.7 Subjetividade do FMEA

O FMEA é uma análise protocolar já estabelecida há muito tempo, mas é subjetivo para a identificação sistemática de possíveis causas principais e modos de falha e para a estimativa dos seus riscos relativos (ARABIAN-HOSEYNABADI, ORAEE e TAVNER, 2010). Existe um elevado nível de incerteza no FMEA, uma vez que é resultado de uma decisão em grupo e as informações de avaliação de fatores de risco são baseadas principalmente em julgamentos subjetivos dos peritos que podem ser vagos, imprecisos ou inconsistentes, bem como incertos (LIU et al., 2011).

Uma das contribuições para a subjetividade do FMEA está presente nas escalas dos índices de severidade, ocorrência e detecção, bem como no produto desta multiplicação, o RPN. Segundo Chang (2009), como o FMEA é utilizado para avaliar sistemas mecânicos, que geralmente não tem

entradas e saídas nítidas, as relações entre os modos de falha e efeitos se tornam muito complexas, subjetivas e qualitativas, impactando na subjetividade da escala (S, O e D). Portanto, deve-se, sempre que possível, definir escalas e componentes que sejam dependentes de fatores externos para auxiliar na classificação, que sejam referência para estabelecer os critérios.

Além do mais, pode-se dizer, que a subjetividade está relacionada a utilização de escalas para o cálculo do RPN, pois são escalas ordinais que contêm características difíceis de diferenciar sendo, portanto, também propensas à subjetividade. As notas de avaliação do FMEA podem representar um conceito vago de maneira que, não há clara distinção entre dois graus adjacentes da sua escala (BARENDS *et al.*, 2012).

Durante o processo de desenvolvimento do FMEA, o seu sucesso depende da perícia de um especialista, que muitas vezes é incerto na fase de avaliação dos modos de falha. Sobre isto, Levin e Kalal (2003) apontam que devesse pesar as vantagens e desvantagens que o conhecimento e experiência dos especialistas podem trazer para a discussão antes de incluir ou não esses colaboradores no time.

Além disso, sobre o trabalho em equipe, a AIAG (2008) destaca alguns problemas comuns ao FMEA que as organizações devem se atentar, como:

- No entendimento comum do FMEA;
- Participantes relutantes (arrogantes - *overbearing*) que sobrepe opiniões;
- Opiniões subjetivas tratadas como fatos;
- Desenvolvimento do FMEA sem tempo suficiente;
- Divergências e oposições;
- Agendas ocultas – informações restritas a alguns especialistas;
- Período de mudanças da organização;
- Enxergar o FMEA como mais uma obrigação sem pragmatismo.

Embora o FMEA seja o instrumento mais indicado para ocasiões específicas, ser capaz de trabalhar com diferentes opiniões e estabelecer uma diretriz para a tomada de decisão, segundo a obra de Laurenti (2010), vale a pena ressaltar que é necessário atentar-se ao fato de que colaboradores experientes, que têm investimento emocional no produto/processo, talvez fiquem excessivamente sensíveis durante o processo de críticas e se tornem defensivos. A maioria dos especialistas está disposta a expressar as suas opiniões e impressionar por graus de crença (ou

empirismo) com base em um conjunto de experiências e avaliação própria subconscientes (LIU *et al.*, 2011), tornando a opinião subjetiva. Também há problemas relacionados à cooperação entre os membros de uma equipe, especialmente quando eles têm diferentes origens pessoais e comportamento; em outras palavras, o perfil das pessoas, que podem variar de criativas à analíticas, bem como visões em nível de projeto/negócio diferentes. Consequentemente, esses aspectos afetam demasiadamente o FMEA, salientando ainda mais a sua subjetividade.

Especificamente sobre a subjetividade, resgatando o interesse e justificativa desta Tese relatada no Capítulo 1.1, pode-se destacar a evolução da percepção sobre os impactos e a confiabilidade do FMEA. Entretanto, apesar da menção de subjetividade, todas as publicações que citam este termo foram avaliadas e grande parte apenas menciona o termo subjetividade sem nenhum estudo relacionado.

Portanto, apesar do FMEA ser uma ferramenta consolidada na prática e possuir a estrutura inflexível suportando a metodologia, as experiências práticas e a análise criteriosa da literatura mostram que um avaliador do FMEA pode não ser confiável o suficiente para atribuir as notas aos índices de Severidade, Ocorrência e Detecção, pois seus conceitos são intrínsecos a sua própria opinião e, contudo, são muitas vezes, subjetivos.

2.4.8 Ferramentas aliadas ao FMEA

Com o intuito de superar as barreiras e os problemas relatados nos capítulos anteriores sobre o FMEA, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas para se encontrar uma alternativa que garanta a credibilidade da avaliação dos componentes do FMEA e minimize ou elimine o fator tendenciosidade do ser humano. Muitas abordagens alternativas têm sido sugeridas na literatura para resolver algumas das deficiências do método tradicional e para implementar o FMEA em situações reais de forma mais eficiente (LIU, LIU e LIU, 2013).

Chin *et al.* (2009b) propuseram um FMEA usando o Raciocínio Lógico (ER), que é uma abordagem baseada em grupo para capturar opiniões, diversidade dos membros da equipe do FMEA e priorizar modos de falha sob diferentes tipos de incertezas, tais como avaliação incompleta, ignorância e intervalos. Posteriormente Liu *et al.* (2011) também utilizaram essa metodologia a fim de suplantar a subjetividade do FMEA, cujo trabalho afirma que a principal vantagem da abordagem ER é que ambos os dados precisos e julgamentos subjetivos com a incerteza podem ser modelados de forma consistente sob a estrutura unificada. Apesar dessas

pesquisas, a ER também é considerada uma ferramenta qualitativa e não apresentou resultados que fossem considerados, *a posteriori*, melhores, segundo Liu, Liu e Liu (2013).

Resumidamente, alguns outros métodos modificados incluem variações da estrutura tradicional do FMEA, assim como a sequência das etapas, introduzindo conceitos de DEA (Análise Envoltória de Dados), Teoria de destaque (Evidence theory), Fuzzy TOPSIS, Teoria cinzenta (Grey theory), VIKOR, Matriz de relacionamento de Petri, programação linear, simulação de Monte Carlo, QFD (Quality functional deployment), Modelo baseado em custo (Cost base model – CBM), AHP (Analytic Hierarchy Process), entre outros modelos e ferramentas.

Contudo, relacionado à subjetividade do FMEA, atualmente a grande tendência é a integração de lógica Fuzzy com FMEA, de acordo com a revisão da literatura de Liu, Liu e Liu (2013) e Spreafico, Russo e Caterina Rizzi (2017). Bowles e Pelaez (1995) deram início a utilização do FMEA aliado à lógica Fuzzy, que passou por adaptações ao longo dos últimos anos. Eles foram os primeiros a aplicar a lógica Fuzzy para abordar as diversas vulnerabilidades do FMEA como a inconsistência de avaliações. Então, Bowles e Pelaez (1995) trabalharam diretamente com termos linguísticos e fizeram avaliações de criticidade.

Com o passar do tempo, a metodologia FMEA somada ao Fuzzy, foi ganhando popularidade e melhorias foram sendo propostas. Essas melhorias ampliaram o método inicial de Bowles e Pelaez (1995) que se limitava apenas à uma análise de criticidade para FMEA e construiu-se um Sistema de avaliação Fuzzy mais abrangente para todos os índices de risco. Em todas as tentativas de melhoria os objetivos sempre eram facilitar as avaliações do ponto de vista da engenharia e tratar a subjetividade do FMEA através de variações da lógica Fuzzy, combinada com outras ferramentas. No trabalho de Helvacioğlu e Ozen (2014), por exemplo, os pesquisadores utilizaram a análise de multicritérios com a lógica difusa (Fuzzy Multi-Attribute Group Decision Making - FMAGDM) para melhorar o desempenho com a chamada FMEA FMAGDM.

De acordo com a revisão de Liu, Liu e Liu (2013), as variações de FMEA Fuzzy foram empregadas em 40% dos 75 artigos pesquisados da Literatura. Os autores ainda destacaram os trabalhos mais importantes, que são referências em termos de melhorias e contribuições ao FMEA, e que podem ser conferidos diretamente nas obras de Zafiropoulos e Dialynas (2005), Chin et al. (2008), Nepal et al. (2008), Puente et al. (2002), Pillay e Wang (2003), Yang et al. (2008), Gargama e Chaturvedi (2011), Braglia e Bevilacqua (2000), Braglia et al. (2003a), Tay e Lim (2006a, 2010), Sharma et al. (2005, 2007a, 2007b, 2007c, 2007d, 2008a, 2008b, 2008c), Sharma e Sharma (2010,

2012), Guimarães e Franklin Lapa (2004), Guimarães e Lapa (2004, 2006, 2007), Guimarães et al. (2011) e Keskin e Zkan (2009).

2.5 MSA: Análise do sistema de medição

O MSA (Measurement System Analysis), traduzida para o português como Análise do sistema de medição, é um questionamento sobre o sistema de medição de uma variável. Em resumo, tem o objetivo de avaliar se dois métodos diferentes, ou dois operadores diferentes, utilizando a mesma metodologia e recurso de medição, ou por um operador que realize a repetição da sua própria medição em dois momentos diferentes, produz essencialmente o mesmo resultado (WATSON e PETRIE, 2010).

A partir desses questionamentos, surgiu a Análise do sistema de medição (MSA - Measurement System Analysis), que desde então é essencial para a manutenção e sobrevivência das organizações de todo o mundo, explanada em detalhes nas próximas seções.

2.5.1 Conceito do MSA

A MSA pode ter muitas definições, como a mais genérica que diz que é como um conjunto de ferramentas útil para o entendimento da variação do sistema de avaliação ou medição. Hajipour, Kazemi e Mousavi (2013) disseram que, a MSA é uma coleção de métodos estatísticos para a análise da capacidade do sistema de medição. O Manual de MSA da QS-9000 (1997) traz que: “Sistema de Medição é o conjunto de operações, procedimentos, dispositivos de medição e outros equipamentos, software e pessoal usado para atribuir um número à característica que está sendo medida; o processo completo usado para obter as medidas”.

Além da conceituação anterior, a MSA também pode ser definida sabendo que é um elemento importante do Seis Sigma, bem como das normas ISO/TS 16949 (PERUCHI *et al.*, 2014). Na metodologia Seis Sigma, praticantes assimilam rapidamente o papel de críticos sobre os sistemas de medição para iniciar e sustentar a melhoria do processo. Um bom sistema de medição consiste de fatores que incluem exatidão (medir o valor verdadeiro ou padrão), precisão (baixa variação de medição), estabilidade (resultados previsíveis em condições semelhantes ao longo do tempo) e discriminação (capacidade de distinguir diferenças reais).

Segundo Murphy (2009), MSA também é uma continuação da análise de aplicação do Lean Six Sigma, uma filosofia de melhoria de negócios e metodologia, como um meio de nutrir e sustentar uma cultura de avaliação e mudança. Resumidamente, no século XIX, o físico escocês Lord Kelvin proferiu uma frase que é extremamente atual e imprime muito a definição da MSA: o que não pode ser medido, não pode ser melhorado.

A MSA fornece aos responsáveis por tomadas de decisão instrumentos para compreender se a variação deve ser atribuída ao sistema de avaliação em si ou ao operador que está sendo avaliado (MURPHY, 2009).

2.5.2 Escopos e objetivos do MSA

A análise do sistema de medição procura descrever, classificar e avaliar a qualidade das medições, melhorar a utilidade, exatidão, precisão e clareza de medidas e propor métodos para o desenvolvimento de instrumentos novos e melhores de medição (ALLEN e YEN, 1979).

A MSA desempenha um papel importante em ajudar as organizações a melhorar a sua qualidade de produto (PAN, LI e OU, 2015). Para assegurar que a variabilidade do sistema de medição não é prejudicialmente grande, é necessário configurar a análise do sistema de medição (PERUCHI *et al.*, 2014).

Os estudos de MSA fornecem dados com dois objetivos básicos: o primeiro é conhecer as fontes de variação (operador, instrumento de medição, temperatura e etc.) que têm maior influência nos resultados gerados pelo Sistema de Medição; o segundo objetivo, é verificar se o Sistema de Medição possui propriedades estatísticas compatíveis com as especificações (FONSECA, 2008).

Então, através de medição eficaz pode-se conduzir as organizações a realizarem investimentos necessários. Um sistema de medição que não garante a certeza ou proporcione confiabilidade não é capaz de cumprir o seu objetivo principal que é controlar um processo. A MSA procura descrever, classificar e avaliar a qualidade das medições, melhorar a utilidade, exatidão, precisão e clareza de medidas, e propor métodos para o desenvolvimento de novos e melhores instrumentos de medição (DE MAST e VAN WIERINGEN, 2004).

2.5.3 Estudo GR&R

Para controlar de forma adequada e melhorar um processo é necessário medir atributos de saída do processo (PERUCHI *et al.*, 2014). Tal sistema fornece medidas que, devido a erros (aleatórios e sistemáticos), variam do valor verdadeiro (AIAG, 2010). Um sistema de medição que não propicia a certeza ou confiança na medição pode levar a empresa a realizar grandes investimentos na aquisição de instrumentos e outros meios de medição desnecessários (FONSECA, 2008).

O estudo mais comum em MSA para avaliar a precisão dos sistemas de medição é o de Reprodutividade e Repetitividade (ou Reprodutibilidade) (Gage Repeatability & Reproducibility) – GR&R. Reprodutibilidade reflete a variabilidade decorrente de diferentes operadores, configurações, ou períodos de tempo. A Repetitividade representa a variabilidade do calibre ou medição do instrumento quando ele é usado para medir a mesma unidade (com o mesmo operador ou de instalação ou no mesmo período de tempo) (PERUCHI *et al.*, 2014). De um modo geral, o estudo GR&R é realizado de acordo com o indicado no manual MSA QS 9000.

Normalmente, um estudo de GR&R precisa ser realizado antes da análise de capacidade do processo para avaliar a adequação de variação do indicador. Produtos de boa qualidade só podem ser atingidos através de um sistema de medição adequado (PAN, LI e OU, 2015). Para uma discussão mais aprofundada, conferir Montgomery e Runger (2003).

2.5.4 Cálculos e formulações

Os cálculos e formulações, bem como as estatísticas para o sistema GR&R dependem do tipo do sistema de medição. Esse processo é dividido em duas partes, pois dependem essencialmente do tipo de dados que se deseja analisar, que podem ser do tipo: contínuos ou atributos.

Para os dados do tipo atributos, que são os utilizados nesta Tese, a abordagem MSA, devido às características estatísticas, são diferentes da abordagem que se desenvolve para dados contínuos. O Capítulo 2.6 define esses tipos de análises e trata da aplicação da MSA por GR&R atributos que está intitulada como Análise de Concordância.

No Capítulo seguinte, tem-se, em detalhes, as formulações para o cálculo de GR&R para dados do tipo contínuo

2.5.4.1 Dados do tipo contínuos

Para o tipo de dados contínuos, tem-se uma vasta aplicação e teorias publicadas na literatura. O manual da AIAG recomenda avaliar o sistema de medição dimensionando o desvio-padrão do erro de medição com o desvio-padrão total do processo observado. A estatística, denominada porcentagem R&R, é definida como (PAN, LI e OU, 2015):

$$\%R\&R = \left(\frac{\sigma_{\text{medição}}}{\sigma_{\text{Total}}} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

De acordo com AIAG (2010), a variação dos valores de medição pode ser dividida essencialmente em dois componentes:

$$\sigma_{\text{obs}}^2 = \sigma_{\text{peça}}^2 + \sigma_{\text{medição}}^2 \quad (3)$$

Onde $\sigma_{\text{peça}}^2$ é o componente de variância devido ao produto/item e $\sigma_{\text{medição}}^2$ bitola é o componente de variância devido a medição. Além disso, a variabilidade de medições pode ser ainda definida como (DE MAST e VAN WIERINGEN, 2004):

$$\sigma_{\text{medição}}^2 = \sigma_{\text{Repetitividade}}^2 + \sigma_{\text{Reprodutividade}}^2 \quad (4)$$

Onde $\sigma_{\text{Repetitividade}}^2$ representa Repetitividade e $\sigma_{\text{Reprodutividade}}^2$ representa a Reprodutibilidade. A informação obtida a partir do estudo GR&R pode ser utilizada para quantificar as variações e fornecer orientações úteis para melhorar a exatidão e precisão de um sistema de medição (PERUCHI *et al.*, 2013; PERUCHI *et al.*, 2014; PAN, LI e OU, 2015).

2.5.5 Variabilidade do sistema de medição

Segundo o Manual de MSA da QS-9000 (1997), para se controlar a variação do sistema de medição é necessário identificar as fontes de variação potenciais e eliminar ou monitorar essas fontes de variação (FONSECA, 2008).

Um aspecto importante da análise do sistema de medição é a avaliação da precisão de um sistema de medição (DE MAST e VAN WIERINGEN, 2007). A precisão de um sistema de medição é sua consistência em múltiplas medições por objeto. Por precisão, diz-se a medida, na qual encontramos resultados semelhantes se medirmos (as propriedades) do mesmo objeto várias vezes, com os mesmos instrumentos de medição (DE MAST e VAN WIERINGEN, 2004). Outros termos também podem ser empregados para expressar os mesmos conceitos, como na ISO 5725, que emprega dois termos “rigor/veracidade” e até mesmo “precisão”.

O método padrão para avaliar a precisão dos sistemas de medição, que medem em uma escala métrica é o método GR&R (BURDICK *et al.*, 2003). A precisão depende do campo onde o sistema de medição é utilizado e a estatística industrial concentra-se na medição de propagação (MONTGOMERY e RUNGER, 1993a; MONTGOMERY e RUNGER, 1993b; KERLINGER e LEE, 2000). Em ambos os campos, a precisão da medição é avaliada por meio de um experimento usando os princípios fundamentais de concepção experimental (DE MAST e VAN WIERINGEN, 2004).

Em um estudo MSA a preocupação também é tanto com a exatidão (a maneira em que um valor observado de uma quantidade concorda com o valor verdadeiro), quanto com a precisão (WATSON e PETRIE, 2010).

Segundo Silva (2002), há propriedades comuns a todos os processos de medição que devem ser levados em consideração estatística, como:

- O sistema de medição deve estar sob controle estatístico, o que significa que a variação no sistema é devida somente a causas comuns e não a causas especiais;
- A variabilidade do sistema de medição deve ser pequena se comparada com a variabilidade do processo de manufatura;
- A variabilidade do sistema de medição deve ser pequena quando comparada com os limites de especificação;
- Os incrementos de medida devem ser pequenos com relação ao que for menor entre a variabilidade do processo ou os limites de especificação.

2.5.5.1 Fonte de variação

Quando se mede uma variável, os dados sempre exibem, em maior ou menor grau, uma dispersão de valores. Existe a variação entre indivíduos (*between*), bem como a variação intraindivíduos (*Within*) (WATSON e PETRIE, 2010). Grande parte dessa variabilidade é devido à variação por fatores associados (por exemplo, genéticos ou fatores sociais, ambientais). Por exemplo, se esses indivíduos diferem em termos do seu estado reprodutivo, idade, peso e sexo, bem como as medições dos hormônios no sangue podem variar. Da mesma forma, se tomarmos medidas repetidas de um indivíduo em diferentes momentos do dia, eles podem variar. Esta variabilidade é denominada variação de medição (WATSON e PETRIE, 2010).

O erro de medição é definido como aquele que surge porque os valores observados (ou a “medição”) e os verdadeiros valores de uma variável diferem. Um sistema de medição pode ser impactado por duas fontes de variação: a aleatória e a sistemática (HAJIPOUR, KAZEMI e MOUSAVI, 2013;PERUCHI *et al.*, 2013). Estas fontes são provenientes de causas comuns e causas especiais, na qual:

- Aleatório: os valores observados, por vezes, podem ser maiores ou menores do que os valores verdadeiros, mas, em média tendem a equilibrar-se.
- Sistemático: os valores observados têm uma tendência a ser consistentemente altos ou baixos por causa de algum fator estranho, conhecido ou desconhecido, que afeta as medições do mesmo modo (por exemplo, por causa de um instrumento que não foi calibrado corretamente ou um observador consistentemente superestimando os valores).

2.6 Análise de Concordância

Embora os sistemas de medição em sua grande parte sejam baseados em dados contínuos, bem como as formulações se concentram em medições de grandezas contínuas, os mesmos conceitos se aplicam com interesse focado em outras formas de medição/avaliação, como em classificações por atributos.

A avaliação do nível de concordância é muitas vezes utilizada na avaliação da reprodutibilidade de um novo ensaio ou instrumento, na aceitabilidade de um processo novo ou genérico, bem como método de comparação (YANG e CHINCHILLI, 2011). Exemplos incluem a avaliação do acordo entre dois métodos (PAN *et al.*, 2009; SHEN, 2009), dois avaliadores quando avaliando simultaneamente uma resposta (BACKLUND *et al.*, 2009; LEVINE *et al.*, 2009), o acordo de valores observados com os valores previstos (BONNIAUD *et al.*, 2006), o acordo entre um método recentemente desenvolvido e um método padrão/referência (TRINKMANN *et al.*, 2010) e a avaliação da bioequivalência (LAVORINI *et al.*, 2007).

Nestes casos, o tipo de análise capaz de estabelecer qual é o grau de acordo é chamado de Análise de Concordância (*Agreement Analysis*). Esse tipo de estudo é necessário, pois segundo Watson e Petrie (2010), ao estabelecer uma técnica de medição, seja ela qual for, é preciso considerar tanto a variabilidade de medição quanto erros de medição.

Além disso, esta Tese é motivada pela necessidade de investigar a subjetividade do FMEA. Isto significa, que baseado nas afirmações da obra de Watson e Petrie (2010), tem-se o interesse de conhecer a habilidade de medição dos avaliadores FMEA, na avaliação de seus modos de falha para S, O, D e RPN, para conferir se, em circunstâncias idênticas, convergem para o mesmo resultado.

Nos próximos capítulos é apresentado, em detalhes, os conceitos da Análise de Concordância.

2.6.1 Dados do tipo atributos

A maior parte das medições em processos industriais baseiam-se em escalas instrumentais como réguas, paquímetros, rugosímetros, cronômetros, etc., cujas são responsáveis pelo controle do processo, bem como pela mensuração das características físicas do produto. No entanto, quando se trata de analisar as qualidades de um produto ou estabelecer uma classificação por notas (graus), é necessário desenvolver essa conceituação por mais de um juiz. Os dados gerados por esse processo são do tipo atributos, ou seja, não são contínuos como os gerados por instrumentos que medem grandezas físicas, por exemplo.

Os dados do tipo atributos estão presentes em diversas áreas, como no desenvolvimento de produtos, a nova versão de um produto deve passar pela supervisão de especialistas que avaliam quais as características que devem permanecer ou serem retiradas do produto por meio de atribuição de notas.

Em projetos de Seis Sigma engenheiros responsáveis devem definir quais são as características críticas (CTQ) para o cliente para desenvolver um estudo DMAIC. Na medicina, para alguns estudos sobre doenças o uso de ferramentas matemáticas se faz necessário para retirar o fator de subjetividade destas pesquisas para um melhor diagnóstico (CHATTOPADHYA e ACHARYA, 2012).

2.6.1.1 Tipos de dados atributos

Os tipos de dados atributos têm divergências com relação a sua classificação. Segundo Allen e Yen (1979), os dados atributos podem ser considerados de dois tipos: nominal ou ordinal, na qual:

- Dados nominais: são variáveis categóricas que têm vários níveis de uma característica sem ordenação natural, tais como, por um estudo da textura do alimento: mal passado, ao ponto e mal passado.
- Dados ordinais: são variáveis categóricas que têm três ou mais níveis de uma característica com uma ordem natural, como: discordo plenamente, discordo, neutro, concordo e concordo plenamente. Ou, em escala ordinal, por exemplo as escalas dos índices de risco do FMEA que são de 1 a 10.

Porém, os tipos de dados variam de acordo com a origem do problema e, por exemplo, podem ser binários, dados nominais e ordinais (SUZUKI, TSUTSUMI e KAWAMURA, 2013). Segundo Alvarado (2008), como exemplos pode-se citar:

- Avaliação do desempenho de um carro (gostei ou não gostei) – tipo binário;
- Classificação da qualidade de um tecido como "bom", "ruim", "manchado" ou "rasgado" – tipo nominal;
- Classificação de sabor, aroma e cor do vinho numa escala de 1-10 – tipo ordinal.

Vale a pena ressaltar, que uma escala ordinal é um conjunto contável com uma ordem definida, mas sem uma distância métrica. Em uma escala ordinal, o número de categorias é finito. Do ponto de vista do trabalho de De Mast e Van Wieringen (2004), a escala discreta é uma escala ordinal com uma métrica de distância imposta. O conceito de distância distingue uma escala ordinal e nominal de uma escala discreta. Para essas escalas uma declaração da forma $a < b$ faz sentido, mas para a escala nominal operações matemáticas não tem significado.

Nesta Tese, o objeto de estudo é o FMEA, que se trata de um instrumento qualitativo, em que temos como base as escalas de 1 a 10 para classificação dos riscos, que são do tipo ordinal.

2.6.2 Objetivos da análise de concordância

Quadro 2-7 Objetivos da Análise de Concordância

As respostas de um avaliador são uniformes?
Os diferentes avaliadores classificam os mesmos elementos de maneira uniforme? Existe concordância entre eles?
As respostas dos avaliadores são exatas quando comparadas ao valor padrão ou uma resposta correta?
O sistema de medição de atributos é efetivo?
Os operadores concordam com as notas de aprovação/reprovação sobre uma amostra de produto?
Estão corretas as classificações dos avaliadores quando comparadas com o padrão fornecido pelo Coordenador da Qualidade?
O sistema de inspeção visual é eficaz para detectar a falta de algum componente chave na montagem?

Fonte: adaptado de Alvarado (2008)

Como visto no Capítulo anterior, as classificações por atributos são realizadas por meio de avaliadores que, de acordo com sua experiência e domínio sobre o assunto, atribuem as notas à determinados parâmetros. Nessas situações, as características de qualidade são difíceis de definir e avaliar. As medições realizadas a partir desse tipo de dados são avaliações subjetivas (ALVARADO, 2008) feitas por pessoas e não por meio de medições físicas diretas.

A partir desses agravantes, surgiu a Análise de Concordância, que tem o objetivo de avaliar a uniformidade das respostas dentro de um grupo de avaliadores. Segundo Yang e Chinchilli (2011), a Análise de Concordância é frequentemente utilizada na avaliação da reprodutibilidade de um novo ensaio, ou de um instrumento, na aceitabilidade de um processo novo ou genérico assim como no método de comparação.

De maneira ampla, a Análise de Concordância busca responder as perguntas adaptadas de Alvarado (2008), apresentadas no Quadro 2-7, que resumem os motivos e metas de sua utilização.

2.6.3 GR&R por atributos

A diferença da análise GR&R por atributos para a contínua é que o sistema de avaliação por atributos tem classe de sistemas de medição sempre com valores de número finito de categorias, ou seja, está em contraste com o sistema de medição de variáveis contínuas, que podem assumir uma escala contínua de valores, fazendo com que a aplicação estatística seja distinta. Isto faz com que para dados do tipo atributos, a abordagem para realizar o estudo GR&R seja diferenciada.

Além disso, o comportamento dos dados não pode ser tratado da mesma maneira, pois os atributos apresentam características estatísticas não paramétricas. O principal motivo para seu uso, comparado com a estatística paramétrica, é que os testes não paramétricos são mais adequados para dados não normalmente distribuídos, cujo é o caso de dados sensoriais, ordinais, etc. (YUE, PILON e CAVADIAS, 2002). Bland e Altman (1986) relataram em sua obra que a análise inadequada de concordância, através de coeficiente de correlação para dados contínuos, estava frequentemente sendo empregada como medida de concordância. Isso conduz a resultados estatisticamente errôneos.

Então, o único método que possibilita a Análise de Concordância por atributos é o “GR&R por atributos”. A concordância de opinião do avaliador consigo mesmo é um conceito semelhante à Repetitividade e concordância entre observador é um conceito semelhante ao de Reprodutibilidade oriundos da análise por GR&R (SUZUKI, TSUTSUMI e KAWAMURA, 2013). A exatidão das avaliações é a correlação a um padrão de avaliações corretas, como um gabarito (*standard*), o que não é possível no FMEA.

A análise GR&R por atributos está relacionada com a precisão, que é o acordo entre as opiniões dos avaliadores. Duas atribuições de nota a um objeto são significativas se são idênticas (DE MAST e VAN WIERINGEN, 2004). Para obter classificações significativas, os avaliadores devem concordar com as suas respostas (Repetitividade), e com os demais especialistas (Reprodutividade) e se houver um padrão/referência também temos a análise de correlação (MURPHY, 2009).

Então, para que seja possível a análise por GR&R atributos, temos que cumprir pelo menos um dos critérios do Quadro 2-8 a seguir:

Quadro 2-8 Critérios para a análise GR&R por atributos

Dois ou mais avaliadores avaliarem os mesmos elementos (Reprodutividade)
O mesmo avaliador avaliar os mesmos itens mais de uma vez (Repetitividade)
Um avaliador qualificar elementos e comparar o seu desempenho com um padrão (Correlação de precisão)

O objetivo da GR&R por atributos é identificar variações de avaliação entre avaliadores (*Between*) e dos avaliadores consigo mesmo (*Within*). Em suma, a GR&R por atributos é utilizada para avaliar a concordância das avaliações subjetivas nominais ou classificações subjetivas ordinais por vários avaliadores e determinar se há concordância (KENDALL, 1938; 1948a; 1949). O Quadro 2-9 ilustra os questionamentos que motivam a utilização desse tipo de análise.

Quadro 2-9 Objetivos da Análise GR&R por atributos

Será que o avaliador concorda consigo mesmo em todas as provações?
Será que o avaliador está de acordo com o padrão conhecido em todos os ensaios?
Será que todos os avaliadores concordam com eles mesmos (<i>Within</i>) e com os demais (<i>Between</i>) em todas as provações?
Será que todos os avaliadores concordam com eles mesmos, com os outros e com um padrão?

A partir da realização do exame por GR&R atributos é possível determinar se a variação do sistema de medição pode ser atribuída aos avaliadores, ao instrumento de medição ou a própria sistemática de avaliação. Se existe variabilidade de avaliações é sinal que os conceitos não estão claramente entendidos e/ou sendo aplicados de forma consistente por peritos avaliadores, em

termos da Reprodutividade e Repetitividade. Se os colaboradores estão de acordo, é sinal de que as classificações são precisas e as suas avaliações não são questionáveis e limitadas.

Então, através da aplicação da GR&R por atributos, busca-se resolver as questões de variação e subjetividade, enquanto avalia-se um produto ou sistema, extraíndo informações importantes sobre o grau de concordância dos seus avaliadores, bem como auxiliar, identificar e melhorar o desempenho deles. Para isso, é utilizado indicadores de Análise de Concordância que serão discutidos na próxima seção.

2.6.4 Indicadores de Análise de Concordância

A Análise de Concordância por GR&R atributos é uma estatística que pode ser calculada por meio de diversos indicadores de concordância, os quais expressam o nível de concordância das avaliações sob a forma de um número coeficiente que varia numa escala de 0 a 1. Estes indicadores são chamados de coeficiente de concordância, que são um índice de divergência entre a concordância efetiva e a concordância máxima possível (perfeita).

Muitos métodos foram desenvolvidos especificamente para a finalidade de medir o nível de concordância. Cohen (1960) propôs a utilização do coeficiente de “Kappa” para medir o acordo quando as respostas são nominais e mais tarde propôs uma versão ponderada para lidar com respostas ordinais. Agresti (1988) propôs uma análise de concordância através de um modelo linear de associação, que decompõe o acordo em três componentes: acordo ao acaso, acordo esperado e acordo inesperado. Um modelo log-linear foi utilizado para modelar esta decomposição. Laurent (1998) propôs um modelo para avaliar o resultado de concordância por meio de um método aproximado a partir de uma referência. Lin (1989, 1992) propôs o uso de um coeficiente de correlação de concordância quando as respostas são contínuas. A pesquisa de Liu *et al.* (2008) propôs duas medidas objetivas, ou seja, a medida de acordo local individual e a medida acordo global, para avaliar o acordo entre os diferentes métodos de agrupamento.

De todos os indicadores de concordância, destacam-se os coeficientes de Kappa, Fleiss’ Kappa, Kendall, Interclass Correlation (IC), Spearman e Pearson. No próximo Capítulo encontra-se, em detalhes, a escolha dos indicadores utilizados para a análise do FMEA nesta pesquisa.

2.6.5 Escolha dos coeficientes de concordância desta pesquisa

A escolha do indicador de concordância da análise GR&R atributos depende do tipo de atributo que se está analisando, isto é, está ligado com o tipo de dado atributo medido (YUE, PILON e CAVADIAS, 2002). Como visto nas seções anteriores, existem três tipos de dados: nominais, binários ou ordinais. Nesta Tese, a avaliação realizada pelos especialistas junto ao FMEA para a classificação dos modos de falha através da Severidade, Ocorrência e Detecção, bem como o RPN, produzem dados que são do tipo atributos ordinais.

Para dados ordinais, que envolvem uma escala (1 a 10), a escolha correta do coeficiente deve levar em consideração a escala adotada para a atribuição das notas (KENDALL, 1949). Se as variáveis em estudo forem mensuradas no mínimo em escala ordinal, pode-se ainda empregar o coeficiente de contingência, mas um método adequado de correlação por postos utilizará melhor as informações contidas nos dados, sendo, por isso, preferível.

O coeficiente de concordância W de Kendall mede a extensão da associação entre vários conjuntos de pontos de para várias entidades (SIEGEL e CASTELLAN, 1988). É útil para determinar a concordância entre diversos julgamentos a respeito de associação atributos entre dois ou mais avaliadores. Segundo Alvarado (2008), W de Kendall tem aplicação especial como método padrão de ordenação de elementos de acordo com o consenso dos avaliadores, quando não se dispõe de uma ordem objetiva dos mesmos. Em resumo, o índice de W de Kendall é a ferramenta estatística mais adequada para avaliar a associação das notas do FMEA, pois o valor do Coeficiente W, indica o grau de associação de avaliações ordinais por vários avaliadores quando as mesmas amostras são avaliadas (ALVARADO, 2008).

Além disso, os dados ordinais podem ser tratados como casos especiais de escalas bivariadas nominais, pois podem ser traduzidos como certo ou errado, se quisermos comparar avaliações exatamente iguais ou não. Com isso, pode-se ampliar as análises estatísticas através da utilização do coeficiente de concordância de Kappa. Porém, tem-se a limitação da perda de sensibilidade do coeficiente, porque apesar de ser um coeficiente essencial de calcular, tem a desvantagem de não estar relacionado à escala, isto é, por meio deste indicador se considera somente se existe concordância ou não, ao contrário da relativização que o coeficiente W de Kendall proporciona. Desse modo, o método escolhido é o indicador de Fleiss' Kappa, que é uma

extensão do método de Kappa, mas capaz de investigar a concordância de mais de dois avaliadores simultaneamente para um mesmo objeto (FLEISS, 1981).

Então, nesta Tese, a análise de concordância GR&R atributo aplicada ao FMEA será desenvolvida através dos coeficientes de Fleiss' Kappa e de Kendall. O primeiro coeficiente foi escolhido para analisar a concordância de maneira bivariada exata (rigorosa), aliada da análise por W de Kendall, que é uma estatística sensível à escala. Complementando a abordagem proposta nesta tese, como análise geral comparativa utilizou-se também o Interclass Correlation Coefficient (ICC).

A escolha destes indicadores leva em consideração o tipo de dados da pesquisa e o número de avaliadores do FMEA e, portanto, são os apontadores de concordância mais adequados. Nos próximos capítulos estão apresentados em detalhes esses coeficientes.

2.6.5.1 Coeficiente de concordância de Fleiss' Kappa

Um método amplamente usado e frequentemente discutido para avaliar a precisão da medida nominal é o método de análise de concordância através do coeficiente de Kappa (DE MAS e VAN WIERINGEN, 2007). Ele avalia a precisão de um sistema de medição em termos de um índice chamado *Kappa*, que foi originalmente proposto por Cohen (1960).

Originou-se primeiramente nos campos de estatísticas médicas, psicométricas e bioestatística, e posteriormente o método foi adaptado e também ganhou popularidade prática na engenharia de qualidade e estatísticas industriais (DE MAST e VAN WIERINGEN, 2007), na qual é frequentemente empregado para avaliar sistemas de medição em escalas nominais (DE MAST e VAN WIERINGEN, 2004).

A priori, o interesse é no grau de concordância que pode ser medido por Kappa de Cohen (WATSON e PETRIE, 2010), mas é limitado para a análise apenas de dois avaliadores tomados de forma pareada de uma única vez. Então, a partir desse conhecimento, o método de Fleiss' Kappa é uma extensão para múltiplos avaliadores do coeficiente de concordância de Cohen's Kappa com base em sua relação de análise pareada. Esse coeficiente de concordância permite comparações de mais de dois avaliadores de uma única vez (FLEISS, 1971).

O valor Fleiss' Kappa representa o grau de concordância absoluta entre as qualificações, pois trata todas as qualificações incorretas da mesma maneira, sem levar em conta sua magnitude. E este é utilizado para classificações binárias, nominais ou ordinais (ALVARADO, 2008).

Conforme Burn e Weir (2011), a estatística Fleiss' Kappa é utilizada para avaliar se a medida de proporção está de acordo entre os observadores (*Between*) ou dentre os mesmos (*Within*) é melhor que o acaso. Desta maneira, este índice é mais rigoroso que as correlações ou porcentagens brutas. Além disso, pode ser empregado para avaliar a consistência e a concordância entre métodos ou entre avaliadores ao comparar suas aferições a padrões estabelecidos.

Atualmente, o cálculo de Fleiss' Kappa é parte integrante do Manual de Análise de Sistemas de Medição AIAG (AIAG, 2002), conforme o Conjunto de Conhecimentos em Six Sigma - Black Belts da ASQ, e foi incluído em pacotes de software, tais como Minitab (DE MAST e VAN WIERINGEN, 2007).

2.6.5.1.1 Cálculos do coeficiente de Fleiss' Kappa

O cálculo de Kappa é realizado através da Equação (5) (SIEGEL e CASTELLAN, 1988; FLEISS, 1971; DE MAST e VAN WIERINGEN, 2004; WATSON e PETRIE, 2010; SUZUKI, TSUTSUMI e KAWAMURA, 2013):

$$\text{Kappa} = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (5)$$

Onde:

P_o – proporção de k vezes em que os avaliadores concordaram, calculado através da Equação (6):

$$P_o = \frac{1}{Nn * (n - 1)} \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k x_{ij}^2 - Nn \right) \quad (6)$$

P_e – a proporção esperada de k vezes em que os avaliadores concordaram, calcula-se P_e através da Equação (7):

$$P_e = \sum p_j^2 \quad (7)$$

Onde:

p_j^2 – é proporção esperada de concordância para cada categoria, conforme Equação (8):

$$p_j = \frac{1}{Nn} \cdot \sum_{i=1}^N x_{ij} \quad (8)$$

Onde:

x_{ij} : número de avaliadores que atribuiu o tema i situado na categoria j

N : número de temas

n : número de avaliadores

k : número de categorias da escala

2.6.5.1.2 Interpretação de Fleiss' Kappa

O coeficiente de Fleiss' Kappa fornece o grau de associação ou concordância entre as notas atribuídas por diferentes avaliadores para diferentes objetos analisados. Primeiramente, deve ser investigado se o coeficiente calculado é significativo através da estatística F ou Chi-Quadrado (os valores críticos desses parâmetros podem ser conferidos na tabela R (SIEGEL, 1988)). Sendo assim, deve-se verificar para um intervalo de confiança com $\alpha = 0,05$, conforme o Quadro 2-10:

Quadro 2-10 Teste de hipóteses (Fleiss' Kappa)

<u>Teste de Hipóteses para Fleiss' Kappa</u>
$P - valor > 0,05$, H_0 é aceito e indica que o índice de Fleiss' Kappa não é significativo, ou seja, a hipótese nula não pode ser rejeitada.
$P - valor < 0,05$, H_0 é rejeitada e implica que existe significativa concordância Fleiss' Kappa entre os observadores.

A partir de valores significativos, pode-se analisar o indicador quanto ao nível de concordância apresentado. O Fleiss' Kappa é uma medida de concordância do avaliador consigo mesmo e entre observadores e mede o grau de concordância, além do que seria esperado tão somente pelo acaso e varia geralmente de 0-1 (embora os números negativos sejam possíveis) em que um valor significativo próximo de 1 indica maior concordância e valores próximos ou menores que zero sugerem que o acordo é atribuível ao acaso (DE MAST e VAN WIERINGEN, 2004; WATSON e PETRIE, 2010; YANG e CHINCHILLI, 2011). Em outras palavras, o valor máximo de 1 representa total concordância e os valores próximos de 0, indicam nenhuma concordância.

Alvarado (2008) sugere que os valores de Kappa iguais ou superiores a 0,75 são considerados de bom a excelentes; valores abaixo que 0,40 indicam pouca concordância, baseados nas informações, o autor sugere que:

- Se $Kappa = 1$, a correlação é perfeita;
- Se $Kappa = 0$, a correlação é igual ao esperado sob as probabilidades;
- Se $Kappa < 0$, a correlação é mais fraca do que o esperado de acordo com as probabilidades (isso acontece muito raramente).

Diretrizes AIAG (2002) sugerem que valores Kappa maiores que 0,75 indicam de boa à excelente concordância, já valores inferiores a 0,40 indicam concordância ruim.

De maneira geral, através de resultados baixos do coeficiente de Fleiss' Kappa tem-se estatisticamente alerta de que os avaliadores divergem a pontuação atribuída ou o método de diagnóstico necessita ser discutido e melhorado, ou seja, deve-se adotar uma definição mais clara (BURN e WEIR, 2011).

2.6.5.2 Coeficiente de concordância de Kendall

Quando se tem uma escala ordinal de dados, como a classificação dos modos de falha do FMEA é em uma escala de 1 a 10, e deseja-se conhecer qual é a concordância entre os avaliadores enquanto atribuem as notas ao FMEA, o coeficiente de Kendall é o melhor indicador capaz de mensurar esse grau de concordância. É empregado quando o resultado é oriundo de diferentes fontes (a partir de diferentes juízes) que estão avaliando necessariamente mais de dois objetos.

O coeficiente de Kendall até mesmo pode ser descrito como uma medida de concordância entre dois conjuntos de classificações relativas a um conjunto de objetos ou experimentos (SIEGEL e CASTELLAN, 1988). Também é utilizado frequentemente para medir a força de confiabilidade das avaliações do juiz consigo mesmo (Repetitividade) e o grau de concordância da avaliação entre eles (Reprodutividade), ou seja, em análise GR&R por atributos.

Esse coeficiente foi desenvolvido por Kendall e Babington-Smith em 1939. É um indicador que leva em consideração a ordem da escala e é a ferramenta estatística mais adequada para avaliar a associação entre avaliadores (SIEGEL e CASTELLAN, 1988). Além disso, é um coeficiente que indica a associação de avaliações ordinais desenvolvida por mais de dois juízes quando as mesmas amostras são avaliadas. Em suma, o coeficiente de concordância de Kendall é uma medida de

consistência entre avaliadores enquanto medem um determinado número de objetos. Dependendo do campo de aplicação, os avaliadores podem ser variáveis, pessoas, etc. (LEGENDRE, 2005).

Esse coeficiente não faz suposições sobre a natureza da distribuição de probabilidade e pode lidar com qualquer número de resultados distintos, isto é, quando se tem k conjuntos de postos pode-se determinar a associação entre eles utilizando o coeficiente de concordância de Kendall. É uma estatística não paramétrica a partir da normalização da estatística do teste de Friedman e pode ser utilizado para estimar a concordância entre os avaliadores.

O índice Kendall é dividido em dois tipos que estão em detalhes adiante, que *a priori* são:

- O coeficiente de correlação Tau (τ) de Kendall
- Coeficiente de concordância W de Kendall

2.6.5.2.1 O coeficiente de correlação Tau (τ) de Kendall

Se os dados têm origem ordinal e a avaliação é realizada por dois juízes X e Y, de modo que a cada objeto possa ser atribuído uma classificação de ambos avaliadores X e Y, então o índice τ de Kendall fornece uma medida do grau de associação ou de correlação entre os dois conjuntos de avaliações pareadas por X e Y. Assim, se as classificações são realizadas por apenas dois avaliadores e pertencem a uma escala ordinal, então, o coeficiente indicado para ser utilizado é o τ de Kendall.

O coeficiente de correlação por postos de τ de Kendall é empregado como uma medida da correlação com o mesmo tipo de dados para os quais também se utilizam outros tipos de indicadores mais robustos, como o coeficiente de Spearman.

Basicamente, τ de Kendall mede a diferença entre a probabilidade de as classificações estarem na mesma ordem e a probabilidade de estarem em ordens diferentes (SIEGEL e CASTELLAN, 1988). Do ponto de vista amostral estas probabilidades são dadas através das frequências relativas simples como na Equação (9).

$$T = \frac{\text{\#concordâncias} - \text{\#discordâncias}}{\text{número total de pares possíveis}} \quad (9)$$

Deve-se notar que o conceito de concordância utilizado nesta expressão equivale simplesmente a classificações iguais de ambos os avaliadores em qualquer par que aponte que a classificação seja comum (#concordâncias). Para determinar o número de concordâncias tem-se

que inicialmente ordenar as classificações de acordo com um dos avaliadores e a partir disso contar os pares que combinam no mesmo sentido de maneira pareada.

2.6.5.2.2 Coeficiente de concordância W de Kendall

Kendall e Babington-Smith (1939) também propuseram um coeficiente para mais do que dois avaliadores que foi denominado de W de Kendall. Com base nesse coeficiente é possível efetuar um teste de hipóteses:

H_0 : as classificações são independentes;

H_1 : as classificações estão associadas;

Este é um teste que expressa a associação simultânea entre N conjuntos de classificação realizadas por mais de dois avaliadores e é comumente usado para avaliar a confiabilidade entre juízes (SIEGEL e CASTELLAN, 1988).

Por estas razões, o coeficiente de concordância W de Kendall foi selecionado para a análise proposta do FMEA nesta Tese, pois se adequa às exigências da pesquisa, ao contrário do índice de τ de Kendall.

2.6.5.2.3 Cálculos e formulações para W de Kendall

O coeficiente de concordância de Kendall é calculado a partir de uma escala ordinal com três ou mais níveis de intervalo em que os avaliadores a utilizam como referência para atribuir notas para N objetos. Suponha que os dados são organizados em forma de uma tabela disposta como $K \times N$, onde cada linha que representa as fileiras na qual estão as notas atribuídas por cada um dos K avaliadores para cada um dos temas N.

O cálculo estimado do coeficiente de Kendall é desenvolvido através da Equação (10):

$$W_{(Kendall)} = \frac{12 \sum_{i=1}^N R_i^2 - 3 K^2 N(N+1)^2}{K^2 N(N^2 - 1)} \quad (10)$$

Onde:

N – é o número de itens avaliados;

$\sum_{i=1}^N R_i^2$ – é a soma dos montantes quadrados das avaliações para cada uma das N classificações;

K – número de avaliadores.

Entretanto, no caso de avaliações análogas entre os juízes a abordagem é diferente, pois o efeito dos empates é reduzir o valor de W ao invés de aumentá-lo (SIEGEL e CASTELLAN, 1988).

Se a proporção de empates é pequena, o efeito pode ser desprezado. Porém, se esta proporção é demasiadamente grande, deve-se utilizar uma correção que acrescenta ao valor de W para que se torne mais próximo de 1 (concordância perfeita).

Assim sendo, atribui-se a cada valor empatado a média dos postos que lhes caberia se não houvesse empates, cujo é o tratamento usual que se dá aos escores empatados em postos. A correção utilizada é a mesma que ocorre para o coeficiente de correlação de *Spearman* (SIEGEL e CASTELLAN, 1988). Com a correção para os empates, a Equação (11) demonstra como é o cálculo de $W_{(Kendall)}$.

$$W_{(Kendall)} = \frac{12 \sum_{i=1}^N R_i^2 - 3 K^2 N(N+1)^2}{K^2 N(N^2 - 1) - K \sum_{j=1}^k T_j} \quad (11)$$

Onde:

T_j – atribui a média das classificações às observações vinculadas, conforme a Equação (12):

$$T_j = \sum_{i=1}^{g_j} (t_i^3 - t_i) \quad (12)$$

Onde:

t_i – é o número de classificações vinculadas ao grupo i de vínculos

g_i – é o número de grupos de vínculos no conjunto j de classificações.

A decisão de qual expressão utilizar varia de acordo com a linha N de cálculo, ou seja, é executada de maneira iterativa para cada uma das N avaliações dos K especialistas para a tabela de resultados $N \times K$. Kendall (1948b) sugere que a melhor estimativa dos N objetos é fornecida, quando W é calculado pela ordem das várias somas de fileiras.

No software Minitab®, escolhido para os cálculos estatísticos de concordância, as análises foram desenvolvidas de acordo com as características dos dados, através das Equações (10) ou (11), com rotinas de decisão incorporadas que optam automaticamente por qual das duas expressões empregar.

2.6.5.2.4 Interpretação do coeficiente de concordância de Kendall

O coeficiente de Kendall é capaz de fornecer o grau de associação ou concordância entre as notas atribuídas por diferentes avaliadores para diferentes objetos analisados. No entanto, W deve ser investigado quanto a sua significância através da estatística F ou Chi-Quadrado (os valores críticos desses parâmetros podem ser conferidos na tabela R (SIEGEL, 1988)). Sendo assim, deve-se verificar para um intervalo de confiança com $\alpha = 0,05$, conforme o Quadro 2-11.

A partir de valores significativos, pode-se analisar o indicador quanto ao nível de concordância apresentado.

Os valores do coeficiente de Kendall variam em uma escala de 0 até 1. Quanto maior for o valor (próximo de 1), mais forte é a concordância entre avaliadores (SIEGEL e CASTELLAN, 1988). Segundo Siegel (1956) um valor elevado e significativo de W pode ser interpretado no sentido em que os observadores ou juízes estão aplicando essencialmente o mesmo padrão no *ranking* dos N objetos em estudo. O caso contrário é que se W é baixo, com valores próximos a 0, mesmo com $P < 0,05$, significa que existe concordância, mas de maneira fraca, ou seja, pouca concordância.

Vale a pena ressaltar que um valor alto de W , então, significaria que há forte concordância na escolha dos critérios (mesmo que errados), isto é, estão concordando fortemente durante o processo de atribuição e das notas atribuídas aos atributos analisados. Em outras palavras, deve-se notar que o valor W faz referência apenas as ordenações observadas. Na verdade, as atribuições podem estar todas incorretas com relação a algum critério externo. Sendo assim, é possível que uma variedade de juízes concorde em ordenar os itens avaliados empregando os critérios essencialmente "errados".

Quadro 2-11 Teste de hipóteses (*W de Kendall*)

<u>Teste de Hipóteses para W de Kendall</u>
<i>P</i> – valor > 0,05, H0 é aceito e indica que o índice de Kendall não é significativo, ou seja, a hipótese nula não pode ser rejeitada.
<i>P</i> – valor < 0,05, H0 é rejeitada e implica que existe significativa concordância entre os observadores.

Geralmente, coeficientes de Kendall de 0,9 ou superior são considerados muito bons. Para esta pesquisa, desenvolveu-se os critérios de aceitabilidade do FMEA através do coeficiente de concordância de Kendall em detalhes no Capítulo 4.1.4.

2.6.5.3 Interclass Correlation Coefficient (ICC)

O nível de concordância entre avaliações realizadas por juízes a um determinado objeto também pode ser calculado por meio do *Interclass Correlation Coefficient* (ICC).

O cálculo do ICC é importante nas análises estatísticas principalmente por proporcionar a análise da assertividade entre juízes de maneira direta, sem a necessidade de executar cálculos complexos e que relativizam ou consideram diversos fatores. A sua vasta utilização em estatística se deve ao fato desta ferramenta proporcionar inferências preliminares claras sobre a intensidade da concordância sob análise.

Neste trabalho, as avaliações estatísticas de concordância incluem número de inspeção, número de acerto, porcentagem de concordância e intervalo os limites do intervalo de confiança estabelecido em 95%.

2.6.5.3.1 Cálculo do Interclass Correlation Coefficient (ICC)

O ICC calculado a partir do software Minitab® leva em consideração as combinações de Repetitividade ou Reprodutividade, através da Equação (13) :

$$\text{Concordância (\%)} = 100 \times \frac{m}{N} \quad (13)$$

Onde:

m – é o número de acertos (Repetitividade ou Reprodutividade);

N – é o número de avaliações;

O programa calcula o limite inferior da menor porcentagem do intervalo de confiança quando $\alpha = 0,05$ com a Equação (13):

$$\frac{v_1 \cdot F_{v_1 v_2, 0,025}}{v_2 + v_1 \cdot F_{v_1 v_2, 0,025}} \quad (14)$$

Onde:

$$v_1 = 2m$$

$$v_2 = 2(N - m + 1)$$

$F_{v_1 v_2, 0,025} = 2,5\%$ da distribuição F com graus de liberdade v_1 e v_2

Se a porcentagem é igual à zero (sem concordância), o limite inferior é zero. Se a porcentagem é igual a 1 (concordância perfeita), utiliza-se α ao invés de $\alpha/2$ na Equação (14).

Para o limite superior do intervalo de confiança quando $\alpha = 0,05$ na Equação (15), seguem:

$$\frac{v_1 \cdot F_{v_1 v_2, 0,975}}{v_2 + v_1 \cdot F_{v_1 v_2, 0,975}} \quad (15)$$

Onde:

$$v_1 = 2(m + 1)$$

$$v_2 = 2(N - m)$$

$F_{v_1 v_2, 0,975} = 97,5\%$ da distribuição F com graus de liberdade v_1 e v_2 .

Se a porcentagem é igual à zero (sem concordância), utiliza-se α ao invés de $\alpha/2$ na Equação (15). Se a porcentagem é igual a um (concordância perfeita), o limite superior é igual a 1.

2.6.5.3.2 Interpretação do *Interclass Correlation Coefficient* (ICC)

O ICC é um índice de análise de concordância intuitivo, pois sua escala é estruturada de 0 a 100%, cuja é largamente empregada para expressar ou realizar comparações em relação a parâmetros pré-determinados, como um padrão/referência.

A propósito, um valor alto de ICC, ou seja, valores próximos ao limite superior de 100% significa que há forte concordância na escolha dos critérios (mesmo que errados), em outras palavras, as avaliações atribuídas concordam exatamente e as notas são idênticas. Em

contrapartida, valores próximos a 0% representam que não há concordância em relação ao ICC, isto é, as avaliações não são análogas.

2.7 Considerações finais

Este Capítulo de revisão da literatura teve como objetivo apresentar todo o suporte teórico necessário para o desenvolvimento e entendimento desta pesquisa.

A evolução do FMEA, o processo de atribuição de suas notas e os conceitos sobre MSA foram detalhados e apresentados através dos índices de concordância de GR&R por atributos, a fim de embasar as análises e proporcionar a discussão dos resultados desta obra.

Sobretudo, nesta revisão abrangente sobre o FMEA relatada em cada um dos capítulos anteriores, destacou-se também pontos negativos e oportunidades de estudo deste instrumento que é largamente utilizada na academia e indústria. Através desta análise crítica, é possível abordar ao problema de pesquisa e motivação desta Tese, a qual foi modelada, estruturada e desenvolvida uma abordagem quantitativa estatística ao FMEA, apresentada nos próximos capítulos desta obra.

3 MÉTODO DE PESQUISA

3.1 Considerações iniciais

Este Capítulo apresenta a metodologia empregada nesta Tese, a qual foi desenvolvida e inspirada nas obras de Miguel *et al.* (2010) e Dalosto (2015), utilizando-se as diretrizes análogas da pesquisa deste último autor.

Nesta seção, primeiramente, será exibida a classificação desta pesquisa científica, quanto à natureza, aos objetivos, a abordagem e ao método. Em seguida, é apresentada a definição do método experimental, o desenvolvimento da análise estatística e o desenvolvimento da pesquisa.

3.2 Classificação desta pesquisa

Este trabalho pode ser classificado, segundo Miguel *et al.* (2010):

Quanto à natureza:

- Básica, pois visa agregar material científico à literatura, sem interesses econômicos;

Quanto aos objetivos:

- Explicativa, uma vez que busca explicar as divergências no FMEA e propor solução experimental para a identificação das mesmas. Esta Tese visa discutir os efeitos da aplicação da análise de concordância ao FMEA;

Quanto à abordagem do problema:

- Quantitativa, pois visa traduzir fenômenos qualitativos em quantitativos (científico). Os resultados do desempenho dos analistas no projeto são investigados a fim de solucionar o problema encontrado na literatura, que é a subjetividade do FMEA, que neste trabalho é abordado de maneira quantitativa por meio da análise de concordância e seus índices estatísticos.

Quanto ao método de pesquisa:

- Experimental, uma vez que, o objeto de estudo está definido e visa relacionar as suas variáveis na forma de causa e efeito, nesse caso, o FMEA e a subjetividade, através da análise de concordância.

3.3 Definição do método de pesquisa experimental

O método de pesquisa experimental foi escolhido por ser o que mais se adequa para se estudar os efeitos e causas das opiniões dos avaliadores enquanto desenvolvem o FMEA, focado na etapa de atribuição das notas aos modos de falha. Este método se justifica, pois segundo Bryman (1989), adquire uma considerável importância na pesquisa organizacional devido, principalmente a fatos como a força desse método de investigação em permitir que o pesquisador faça fortes declarações de causalidade.

Kidder (2004) acrescenta que as pesquisas experimentais são instrumentos altamente especializados e, como quaisquer instrumentos, são excelentes para alguns trabalhos e pouco adequados para outros. Segundo Martins, Mello e Turrioni (2014) os métodos experimentais se adaptam perfeitamente à análise causal. Bryman (1989) ainda considera que a capacidade de estabelecer causalidade é importante para muitos pesquisadores organizacionais, não simplesmente em virtude de sua associação com a abordagem científica, mas devido a tal procedimento ser visto como um caminho para o conhecimento prático e relevante.

3.4 Análise estatística desta pesquisa

Esta Tese é focada na fase de avaliação realizada pelos especialistas dos índices de Severidade, Ocorrência e Detecção, bem como o índice de prioridade de risco (RPN), tomando cada índice de pontuação do FMEA como uma variável. A esse processo de atribuição de notas aos modos de falha do FMEA, será investigado o nível de concordância que os especialistas apresentam e com isso, investigar a cientificidade e subjetividade dessa ferramenta.

A análise estatística será desenvolvida por meio dos conceitos de MSA e das ferramentas de análise de concordância por GR&R atributos. Neste trabalho, baseando-se nos tipos de dados, optou-se pela análise de concordância GR&R atributos através da análise do Interclass Correlation (IC), bem como dos coeficientes de Fleiss' Kappa e Kendall.

3.4.1 Justificativa dos índices estatísticos para a análise do FMEA nesta pesquisa

A escolha dos indicadores dessa pesquisa se justifica através do embasamento apresentado no Capítulo 2.6.5.

A primeira etapa de análise estatística desta Tese é o Interclass Correlation (ICC), que tem o objetivo de fornecer um panorama do nível de exatidão em termos de concordância entre os avaliadores no geral. O ICC é uma análise preliminar, uma vez que proporciona ponderar uma escala de concordância das avaliações aleatórias realizadas pelos avaliadores tomadas em comparação percentual (0 a 100%), ou seja, é uma análise pragmática útil para entender o quanto concordam os avaliadores.

Além disso, para obter a inferência necessária sobre o índice de concordância dos especialistas quanto às avaliações do FMEA, este trabalho explorou os indicadores de Kendall e de Fleiss' Kappa. Estes dois índices proporcionam duas perspectivas complementares para análise de concordância por atributos, cujos se diferem em relação ao tipo de concordância avaliada.

No índice de Fleiss' Kappa os valores calculados representam o grau de concordância absoluta entre as avaliações, ou seja, Fleiss' Kappa compreende todas as classificações incorretas de forma igual, independentemente de sua magnitude. Com isso, tem-se que a limitação da estatística de Fleiss' Kappa está em ser muito criteriosa, exigir que o sistema se comporte sem variação das notas atribuídas, não permitir o cálculo do coeficiente ou simplesmente que este seja muito pequeno e convirja a resultados significativos, o que não ocorre em algumas etapas do FMEA. Nesses casos, é considerado que o sistema não apresenta concordância. Contudo, este índice foi utilizado nesta pesquisa para investigar se há concordância direta, sem levar em consideração a escala ordinal. Por isso, Fleiss' Kappa não explica a magnitude da diferença observada, mas também é importante e deve ser considerado na análise estatística de concordância para se investigar a concordância criteriosa das avaliações e a variação das notas na escala adotada (ALVARADO, 2008).

Por outro lado, a escolha do coeficiente de Kendall é importante porque para dados em escala ordinal do tipo de escala Likert, o indicador W de Kendall leva em consideração a ordem das notas atribuídas. O índice W de Kendall é uma ferramenta estatística mais adequada para avaliar a associação não somente exata, mas ponderada do processo de definição de notas, como por exemplo, utilizando-se uma classificação da gravidade dos defeitos em uma escala de 1 a 10. Isto quer dizer, que se um especialista avalia um processo com severidade 10 e outro com nota 9, não necessariamente estão em total discordância como aponta o índice de Fleiss' Kappa, pelo

contrário, o coeficiente de Kendall indica o grau de associação de avaliações ordinais por vários avaliadores quando as mesmas amostras foram avaliadas.

Através destes índices, desenvolveu-se as suas faixas de aceitabilidade por níveis de concordância do FMEA, apresentadas no Capítulo 4.1 de classificação do FMEA.

No Capítulo 2.6.4 apresenta-se outras referências sobre estes índices.

3.4.2 Desenvolvimento da análise estatística

Todos os cálculos deste trabalho foram desenvolvidos por meio do software “Minitab® *Statistical Software*” (Minitab, USA) e suas bibliotecas de análise de Reprodutividade e Repetitividade de GR&R por atributos.

A Figura 3-1 traz a ilustração do roteiro do desenvolvimento da análise estatística que essa pesquisa utilizou como metodologia. A abordagem estatística inicia-se pela observação ICC e o grau de concordância geral. Em seguida, é analisada a significância dos indicadores de concordância escolhidos conforme detalhado na Figura 3-1, na qual os coeficientes de Fleiss’ Kappa e Kendall são avaliados através da investigação do P-valor, Chi-Quadrado (Chi-Qd) de cada experimento e o Chi-Quadrado_{Crítico}.

O coeficiente será significativo se P-valor está abaixo do nível adotado nesse estudo que é de $\alpha = 0,05\%$, portanto deve ser $p - valor < 0,05$ e $Chi - Qd_{Experimento} > Chi - Qd_{crítico}$ para o indicador ser considerado significativo. Estes parâmetros levam em consideração os graus de liberdade (DF) do experimento e o nível de significância adotado α (JOHNSON *et. al*, 1970). Os valores para $Chi - Quadrado_{Crítico}$ foram extraídos da obra de Siegel (1988), apresentados na tabela R como referências estatísticas tabeladas.

Após verificar a significância, confere-se então o nível de concordância dos indicadores através das Tabela 4-1 e Tabela 4-2 apresentadas no Capítulo 4.1.

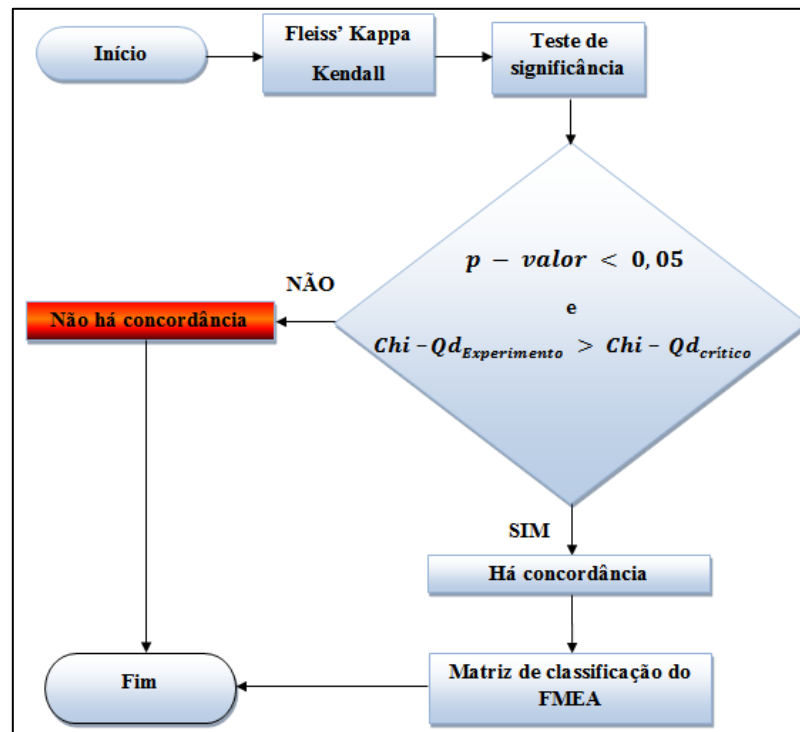


Figura 3-1 Fluxograma da análise estatística do FMEA
 Fonte: adaptado de Dalosto (2015)

3.5 Considerações finais

Esta Tese visa realizar inferências sobre o FMEA e seu desenvolvimento alinhada com as metodologias e práticas estabelecidas na academia, através da aplicação da abordagem quantitativa para investigar e classificar a confiabilidade da ferramenta qualitativa FMEA de acordo com o desenvolvimento da metodologia e etapas descritas neste Capítulo.

4 ABORDAGEM QUANTITATIVA AO FMEA

A abordagem quantitativa ao FMEA será desenvolvida e discutida nesta seção para análise estatística do viés de subjetividade desta ferramenta. Propõe-se nesta Tese, através de casos selecionados, investigar o nível de concordância dos avaliadores FMEA durante a atribuição das notas para a Severidade, Ocorrência e Detecção e o RPN.

Para inferir estatisticamente, este Capítulo utiliza como referência os dados de casos FMEA que foram publicados em trabalhos anteriores de diversos autores, como o trabalho de Landis e Koch (1977), Helvacioğlu e Ozen (2014), uma nova apresentação e discussão dos casos de Dalosto (2015), bem como a obra de Chanamool e Naenna (2016), entre outras importantes fontes.

Portanto, neste Capítulo, o FMEA será avaliado por meio de casos selecionados, levando em consideração os tipos de FMEA mais empregados na literatura e indústria, conforme citado na revisão do estado da arte da seção 2.4. Abaixo os casos que serão avaliados neste Tese:

<u>CASO</u>	<u>TIPO DE FMEA</u>	<u>FONTE DOS DADOS</u>
1	FMEA Tradicional	Experimento da Literatura
2	FMEA FMAGDM	Experimento da Literatura
3	FMEA Experimental	Experimento
4	FMEA FUZZY	Experimento da Literatura

4.1 Análise estatística de Concordância do FMEA

Este Capítulo é dedicado à apresentação das Matrizes de classificação do FMEA e a inferência sobre a confiabilidade da mesma. Esta classificação está embasada na análise de concordância por atributos que é largamente empregada para verificar o grau que juízes concordam entre si (DE MAST e WIERINGEN, 2004; WATSON e PETRIE, 2010; DE MAST e VAN WIERINGEN, 2007; ALVARADO, 2008). Como discutido anteriormente no Capítulo 2.5 e justificado no Capítulo 3.4.1, os indicadores escolhidos para avaliar a subjetividade do FMEA são o *Interclass Correlation Coefficient* (ICC), bem como os índices de concordância de Fleiss' Kappa e de Kendall.

De acordo com dados da literatura, alguns indicadores de concordância já têm faixas de classificação definidas por diversos autores, como é o caso do coeficiente de concordância de

Cohen's Kappa, Pearson e Fleiss' Kappa. Este último tem faixa de aceitabilidade definida e foi adaptada ao FMEA. Entretanto, para o índice de Kendall uma matriz de classificação é proposta neste trabalho e está apresentada adiante.

A aplicação desses conceitos e as referências estabelecidas serão utilizadas para classificar os casos presentes nos capítulos a seguir.

4.1.1 *Interclass Correlation Coefficient (ICC)*

O *Interclass Correlation Coefficient* é a análise estatística, que foi considerada nesta abordagem quantitativa, como preliminar, pois permite avaliar a porcentagem de concordância das avaliações realizadas pelos avaliadores e, principalmente, permite verificar o grau geral de avaliações idênticas numa escala de 0 a 100%.

4.1.2 **Matriz de classificação Fleiss' Kappa**

O coeficiente de Fleiss' Kappa é um dos instrumentos de análise de concordância cujas faixas classificação de aceitabilidade foram propostas por Landis e Koch em 1977. Tal definição foi adaptada ao tema desta pesquisa a fim de classificar o FMEA em relação a análise do índice de Fleiss' Kappa dos índices de prioridade de risco, conforme apresentado na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 Classificação do índice de Fleiss' Kappa

Nível de concordância	Fleiss' Kappa
NÃO HÁ CONCORDÂNCIA	Kappa não significativo
LEVE	$0 < \text{Kappa} < 0,20$
CONSIDERÁVEL	$0,21 < \text{Kappa} < 0,40$
MODERADO	$0,41 < \text{Kappa} < 0,60$
BOM	$0,61 < \text{Kappa} < 0,90$
PERFEITO	$\text{Kappa} > 0,91$

Fonte: adaptado de Landis e Koch (1977)

Essa tabela de classificação é referência para índices significativos de Fleiss' Kappa, ou seja, são significativos desde que estes índices calculados apresentem $p - \text{valor} < 0,05$. Caso

contrário, os dados analisados apontam que não existe correção estatística entre as avaliações e, portanto, o sistema é classificado como “NÃO HÁ CONCORDÂNCIA” das avaliações.

4.1.3 Desenvolvimento da classificação por Kendall

Sobre o coeficiente de concordância W de Kendall que foi essencialmente aplicado ao objeto de estudo desta Tese não há nenhuma fonte na literatura ou estudo até o momento que aplique essa metodologia ao FMEA, bem como nenhuma alusão de aceitabilidade específica. Devido a essa carência de referência, neste trabalho são propostas faixas de aceitabilidade do FMEA a partir do coeficiente de Kendall. Essas faixas estão dispostas como uma matriz que classifica o FMEA quanto aos resultados calculados de W de Kendall para cada um dos especialistas que o avaliaram, assim como para classificar o desempenho geral dos avaliadores.

Essas faixas de aceitabilidade foram desenvolvidas com base nas pesquisas sobre estatísticas não paramétricas na literatura, como em Kendall e Babington-Smith, 1939; Friedman, 1940; Kendall, 1948a; Siegel, 1956; Fleiss, 1971 e Landis e Koch, 1977; Montgomery e Runger, 2003. Dessas fontes é necessário destacar as pesquisas de Kendall e Babington-Smith (1939) e, posteriormente, Siegel (1956) sobre o coeficiente de concordância de Kendall, cujos concluem que um valor significativo e elevado de W pode ser interpretado no sentido em que os juízes estão aplicando essencialmente o mesmo padrão para atribuir as notas. A matriz que classifica o FMEA segue esses critérios, de que, quanto mais alto o valor de W de Kendall (significativo), maior é a concordância do FMEA.

Então, a partir dessas referências foi possível propor a Tabela 4-2 para classificar o FMEA em relação ao índice de Kendall, apresentada no próximo Capítulo.

4.1.4 Matriz de classificação Kendall

Para o índice de Kendall, não há referência na literatura com faixas de classificação para sistemas de medição. Para que fosse possível estabelecer uma referência, nesta Tese, com base no modelo de classificação do índice de Fleiss' Kappa de Landis e Koch (1977) e a proposta de Dalosto (2015), desenvolveu-se nesta obra em nível de Tese, uma nova matriz referência de classificação do FMEA, através do indicador de concordância de Kendall.

O modelo de classificação proposto é apresentado na Tabela 4-2, no qual a classificação é a referência para índices significativos de W Kendall, isto é, estes índices calculados devem apresentar o $p - valor < 0,05$ e $Chi - Qd > Chi - Qd_{crítico}$. Porém, devido a importância da ferramenta FMEA para a tomada de decisão dentro das empresas, também se optou por incluir na matriz de classificação a faixa INACEITÁVEL. Esta faixa é a referência para os dados analisados que não são significativos, isto é, cujos pode-se concluir que NÃO HÁ CONCORDÂNCIA entre as avaliações. Dessa forma, o FMEA é INACEITÁVEL e sugere-se que deva ser rejeitado.

Tabela 4-2 Faixas de aceitabilidade do índice de Kendall

Classificação do FMEA	Kendall
INACEITÁVEL	Kendall não significativo
PÉSSIMO	$0 < Kendall < 0,20$
ATENÇÃO – REVISÃO	$0,21 < Kendall < 0,40$
CONSIDERÁVEL	$0,41 < Kendall < 0,70$
BOM	$0,71 < Kendall < 0,90$
EXCELENTE	$Kendall > 0,91$

Desta forma, a partir de índices significativos de W de Kendall, um FMEA pode ser classificado estatisticamente (vide Tabela 4-2) como PÉSSIMO, o qual sugerimos que deva ser rejeitado; ATENÇÃO – REVISÃO, no qual o FMEA deve ser revisto em conjunto pelos seus avaliadores para discutirem os critérios adotados para a atribuição das notas; CONSIDERÁVEL, o que leva o FMEA a ser aceito ou não, de acordo com o nível de exigência do processo, como por exemplo, processos que exigem alta detectabilidade dos riscos devem desconsiderar o instrumento, já processos menos exigentes podem considerá-lo; BOM, cujo FMEA pode ser aceito, mas com algumas ressalvas novamente do nível de exigência que se espera do FMEA, sobretudo exige revisão e discussão pela equipe sobre o resultado alcançado; e, por fim, EXCELENTE, no qual a ferramenta é aceita plenamente.

4.2 CASO 1 - Análise estatística do FMEA Tradicional

Para esta análise do FMEA Tradicional através de GR&R foram utilizados os dados do trabalho de Helvacioğlu e Ozen (2014). Os autores aplicaram, na área de design de sistema de iates, o FMEA tradicional e o FMAGDM (Fuzzy Multi-Attribute Group Decision Making), cuja análise será apresentada no próximo Capítulo.

Para esta Tese, utilizou-se o banco de dados disponível no trabalho de Helvacioğlu e Ozen (2014), para examinar estatisticamente o sistema de medição por meio de análise de concordância do FMEA tradicional e inferir sobre o comportamento da técnica do FMEA em relação à confiabilidade do processo de atribuição de suas notas.

É importante alinhar, que as análises foram realizadas de forma análoga a condução descrita no Capítulo 4.4.3, utilizando o software Minitab® 16 e suas bibliotecas de MSA. Novamente, para investigar a concordância utilizou-se o ICC, assim como os índices de Fleiss' Kappa, Kendall e as classificações do FMEA apresentadas na Tabela 4-1, com relação ao índice de Fleiss' Kappa e a Tabela 4-2, para o coeficiente de Kendall apresentadas no Capítulo 4.1.

No próximo Capítulo são apresentados, em detalhes, a análise por GR&R atributo do FMEA tradicional. Os comentários e discussões são realizados ao longo das seções conforme os cálculos estatísticos e na última parte do Capítulo, os resultados dessas análises são comparados, bem como as conclusões em relação a subjetividade do FMEA Tradicional.

4.2.1 Base de dados do FMEA Tradicional

No trabalho de Helvacioğlu e Ozen (2014), o FMEA de *design* de iates foi desenvolvido por meio da experiência de seis especialistas da área. Os modos de falha e efeitos para a maneira de falha de função, subsistema e componente foram definidos pelos técnicos de áreas diferentes, cujos foram selecionados para analisar os modos de falha dos sistemas de iate e obter um time

homogêneo. A equipe de especialistas identificou dezoito modos de falha numerados como: 1, 1A, 2, 2A, 3, 3A, 3B, 4, 5, 6, 6A, 7, 7A, 8, 8A, 8B, 9, 10, como mostra a tabela a seguir:

Tabela 4-3 RPN do FMEA Tradicional

Modo de Falha	Avaliador 1	Avaliador 2	Avaliador 3	Avaliador 4	Avaliador 5	Avaliador 6
1	48	48	42	48	48	42
1A	45	30	30	36	48	36
2	48	42	42	56	42	42
2A	96	48	72	84	48	72
3	72	96	48	112	63	63
3A	72	72	72	72	90	54
3B	72	72	112	42	72	72
4	108	112	42	42	90	45
5	84	63	63	72	84	72
6	84	36	36	36	36	48
6A	84	42	42	42	63	96
7	45	36	36	36	54	54
7A	54	36	36	36	54	36
8	105	128	96	112	96	56
8A	108	72	72	84	72	72
8B	105	63	84	72	64	72
9	60	42	42	42	63	42
10	63	48	48	48	72	48

Fonte: adaptado de Helvacioğlu e Ozen (2014)

A priori, foi desenvolvido o FMEA tradicional com o objetivo de classificar os modos de falha em termos dos riscos de severidade (S), ocorrência (O), detecção (D) e o produto deles, que é o índice de prioridade de risco (RPN), para que os modos de falha com maior RPN fossem priorizados. O resultado da atribuição de notas ao FMEA tradicional está apresentado na Tabela 4-3 e o resultado RPN, na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 Atributos de classificação para o FMEA tradicional

Modos de falha	AVALIADOR 1			AVALIADOR 2			AVALIADOR 3			AVALIADOR 4			AVALIADOR 5			AVALIADOR 6		
	S	O	D	S	O	D	S	O	D	S	O	D	S	O	D	S	O	D
1	8	2	3	8	2	3	7	2	3	8	2	3	8	2	3	7	2	3
1A	5	3	3	5	2	3	5	2	3	4	3	3	4	4	3	4	3	3
2	8	2	3	7	2	3	7	2	3	7	2	4	7	2	3	7	2	3
2A	8	3	4	8	2	3	8	3	3	7	4	3	8	2	3	8	3	3
3	8	3	3	8	3	4	8	2	3	7	4	4	7	3	3	7	3	3
3A	8	3	3	8	3	3	8	3	3	8	3	3	6	5	3	6	3	3
3B	8	3	3	8	3	3	7	4	4	7	2	3	8	3	3	8	3	3
4	6	6	3	7	4	4	7	2	3	7	2	3	6	5	3	5	3	3
5	7	4	3	7	3	3	7	3	3	8	3	3	7	4	3	6	4	3
6	7	4	3	6	2	3	6	2	3	6	2	3	6	2	3	6	2	4
6A	7	3	4	7	2	3	7	2	3	7	2	3	7	3	3	6	4	4
7	5	3	3	6	2	3	6	2	3	6	2	3	6	3	3	6	3	3
7A	6	3	3	6	2	3	6	2	3	6	2	3	6	3	3	6	2	3
8	7	5	3	8	4	4	8	4	3	7	4	4	8	4	3	7	2	4
8A	6	6	3	8	3	3	8	3	3	7	4	3	8	3	3	8	3	3
8B	7	5	3	7	3	3	7	4	3	6	3	4	4	4	4	6	4	3
9	5	4	3	7	2	3	7	2	3	7	2	3	7	3	3	7	2	3
10	7	3	3	8	2	3	8	2	3	8	2	3	8	3	3	8	2	3

Fonte: adaptado de Helvacioğlu e Ozen (2014)

4.2.2 Análise dos Resultados: FMEA tradicional

A análise por GR&R do FMEA tradicional leva em consideração cada índice de pontuação do FMEA como uma variável para classificar o desempenho do time de especialistas quanto ao FMEA realizado.

Analisou-se as quatro variáveis resposta do FMEA como sistema de medição, tomando cada índice de pontuação do FMEA como uma métrica variável por atributo discreta, na respectiva ordem:

- Severidade
- Ocorrência
- Detecção
- RPN: Índice de prioridade de risco

O artigo produzido por Helvacioğlu e Ozen (2014) não foi conduzido com repetições de avaliações para cada um dos índices acima, portanto, aplicaremos a análise *GR&R* para investigar apenas a grandeza de Reprodutividade: Análise de Concordância dentre os observadores (*Between*). A seguir são apresentadas as análises para cada um dos índices do FMEA tradicional.

4.2.2.1 Severidade

A análise da severidade inicia-se com a Tabela 4-5, que exibe o ICC da quantidade de avaliações combinadas pelos seis especialistas, isto é, o número de avaliações cuja opinião foi análoga para todos os avaliadores para um mesmo modo de falha. Na Tabela 4-5 pode-se conferir, que de um total de 18 modos de falha, apenas em um deles, todos os seis concordaram exatamente, o que representa 5,56% das tentativas.

Tabela 4-5 Análise de Concordância para Severidade

Avaliações	# Combinadas	Porcentagem	95% IC
18	1	5,56	(0,14 ; 27,29)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

A Tabela 4-6, apresenta a análise dos especialistas através do coeficiente de Fleiss' Kappa. Para o experimento $p - valor < 0,05$, o índice de Fleiss é significativo. A partir disso,

o índice global é Fleiss' Kappa = 0,3450, o que classifica o FMEA quanto a análise de severidade, de acordo com a Tabela 4-1, como CONSIDERÁVEL.

Tabela 4-6 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Severidade

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
4	0,2731	0,0608	4,4871	0,0000
5	0,1529	0,0608	2,5130	0,0060
6	0,4899	0,0608	8,0503	0,0000
7	0,2374	0,0608	3,9018	0,0000
8	0,3990	0,0608	6,5570	0,0000
Global	0,3450	0,0370	9,3043	0,0000

A análise do coeficiente de concordância de Kendall é exibida na Tabela 4-7, onde pode-se extrair os dados de $DF = 17$ e $\alpha = 0,05$. Assim, temos tabelado que $\text{Chi-quadrado}_{\text{crítico}} (X^2) = 27,5871$ e comparando-se com o experimento temos $\text{Chi-quadrado}_{\text{Severidade}} > \text{Chi-quadrado}_{\text{crítico}}$ e $p\text{-valor} < 0,05$, ou seja, os seis especialistas concordam a respeito do índice severidade atribuídos aos modos de falha.

Tabela 4-7 Coeficiente de Kendall para Severidade

Coeficiente de Kendall	Chi - Qd	DF	P
0,6962	71,0114	17	0,0000

O índice de *Kendall* = 0,6962 aponta, que a concordância do FMEA para análise da severidade é BOM, segundo a Tabela 4-2. Essa análise estatística apresentou que há concordância entre os avaliadores e que o FMEA, em termos da severidade, apresenta o consenso que deve existir na utilização da ferramenta.

4.2.2.2 Ocorrência

Para a avaliação da ocorrência sobre os modos de falha, pode-se observar o ICC através da Tabela 4-8 na qual duas combinações das avaliações de um total de 18 modos de falha foram obtidas, ou seja, 11,11%.

Tabela 4-8 Análise de Concordância para Ocorrência

Avaliações	# Combinadas	Porcentagem	95% IC
18	2	11,11	(1,38; 34,71)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

O índice de Fleiss' Kappa é significativo, pois $p - valor < 0,05$. Para classificar o FMEA temos que, Fleiss' Kappa global = 0,1886, o que permite ao sistema FMEA ser classificado com concordância LEVE. Isto quer dizer, que os avaliadores tiveram dificuldade durante o processo de classificação da ocorrência (Tabela 4-9).

Tabela 4-9 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Ocorrência

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
2	0,3403	0,0608	5,5923	0,0000
3	0,1411	0,0608	2,3191	0,0102
4	0,0930	0,0608	1,5294	0,0631
5	-0,0384	0,0608	-0,6319	0,7363
6	-0,0188	0,0608	-0,3100	0,6217
Global	0,1886	0,0402	4,6847	0,0000

A investigação do coeficiente de Kendall também apresenta Chi – quadrado_{crítico} (X^2) = 27,5871, e comparando com o cálculo experimental tem-se Chi – quadrado_{Ocorrência} > Chi – quadrado_{crítico} e $p - valor < 0,05$. Então, o índice é significativo e os especialistas concordam entre si.

Tabela 4-10 Coeficiente de Kendall para Ocorrência

Coeficiente de Kendall	Chi - Qd	DF	P
0,5313	54,1897	17	0,0000

Analisando-se o quanto concordam os especialistas, observou-se que, o índice Kendall = 0,5313 (Tabela 4-10), segundo a Tabela 4-2, a classificação do FMEA é CONSIDERÁVEL para a concordância. Essa classificação está abaixo do desejado (Kendall > 0,60) e pode-se dizer, que o FMEA tradicional está estatisticamente comprometido com relação ao índice de Ocorrência.

4.2.2.3 Detecção

Para a detecção dos modos de falha, o ICC apresenta que a quantidade de avaliações idênticas foi de 9 dos 18 modos de falha avaliados (Tabela 4-11), o que corresponde a 50% de combinações das opiniões dos especialistas. Essa quantidade de combinação talvez possa ser explicada pelo fato do FMEA se tratar de modos de falha relacionados com incêndio em iates,

cuja detecção pode ser realizada visualmente, através do calor, fumaça ou detectores eletrônicos de sinais de fogo instalados como controle.

Tabela 4-11 Análise de Concordância para a Detecção

Avaliações	# Combinadas	Porcentagem	95% IC
18	9	50,00	(26,02; 73,98)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

Entretanto, a análise de detectabilidade dos modos de falha, de acordo com o cálculo da estatística de Fleiss' Kappa, não foi significativa, pois $p - valor < 0,05$ (Tabela 4-12). Segundo o índice de Fleiss' Kappa, a concordância do FMEA é classificada como sem concordância das avaliações, isto é, acordo com a Tabela 4-1, NÃO HÁ CONCORDÂNCIA.

Tabela 4-12 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Detecção

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
3	0,0480	0,0608	0,7891	0,2150
4	0,0380	0,0608	0,6253	0,2659
Global	0,0410	0,0573	0,7164	0,2369

Para o cálculo do coeficiente de Kendall, tem-se o valor do Chi – quadrado_{Detecção} = 21,8113, e comparando com o valor crítico temos Chi – quadrado_{Detecção} < Chi – quadrado_{crítico}, apesar de $p - valor > 0,05$. Então, tem-se que o índice não é significativo e os especialistas não concordam entre si.

Tabela 4-13 Coeficiente de Kendall para a Detecção

Coeficiente de Kendall	Chi - Qd	DF	P
0,2138	21,8113	17	0,1921

Esse resultado para o índice de Kendall considera o FMEA estudado em relação a detecção como INACEITÁVEL. Como discutido no Capítulo 2.6.5.2, sobre o cálculo do coeficiente de Kendall, os empates nas avaliações para o cálculo de Kendall devem ser acrescidos de um termo que corrige este índice no sentido de aumentar a concordância e que, mesmo assim, apesar das avaliações terem sido apenas notas 3 e 4, o coeficiente de Kendall ainda está abaixo do desejado.

4.2.2.4 RPN

O RPN do FMEA também foi analisado em termos da concordância. Como exibido pela Tabela 4-14 da análise do ICC, dos 18 modos de falha gerados pela avaliação dos índices de risco pelos seis avaliadores, em nenhuma delas o RPN foi igual.

Tabela 4-14 Análise de Concordância para o RPN

Avaliações	# Combinadas	Porcentagem	95% IC
18	0	0,00	(0,00, 15,33)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

O índice de Fleiss' Kappa calculado tem $p - valor < 0,05$ e, portanto, é significativo como pode-se conferir na Tabela 4-15. Com Fleiss' Kappa = 0,1884, o RPN do FMEA realizado no estudo de Helvacioğlu e Ozen (2014) é classificado com concordância LEVE.

Tabela 4-15 Coeficiente de Fleiss' Kappa para o RPN

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
30	0,1849	0,0608	3,0383	0,0012
36	0,4228	0,0608	6,9478	0,0000
42	0,3250	0,0608	5,3402	0,0000
45	-0,0285	0,0608	-0,4694	0,6806
48	0,2778	0,0608	4,5649	0,0000
54	0,1192	0,0608	1,9590	0,0251
56	-0,0188	0,0608	-0,3100	0,6217
84	-0,0082	0,0608	-0,1348	0,5536
90	-0,0188	0,0608	-0,3100	0,6217
96	0,0353	0,0608	0,5806	0,2807
105	-0,0188	0,0608	-0,3100	0,6217
108	-0,0188	0,0608	-0,3100	0,6217
112	-0,0384	0,0608	-0,6319	0,7363
128	-0,0093	0,0608	-0,1535	0,5610
Global	0,1884	0,0201	9,3431	0,0000

Analisando a Tabela 4-16 a seguir, sobre a investigação do coeficiente de Kendall, tem-se para os dados apresentados que $\text{Chi - quadrado}_{\text{crítico}} (X^2) = 27,5871$ e $\text{Chi - quadrado}_{\text{RPN}} = 68,5529$, bem como $p - valor < 0,05$. Assim, comparando-se os termos tem-se $\text{Chi - quadrado}_{\text{crítico}} < \text{Chi - quadrado}_{\text{RPN}}$ e com isso, considera-se o coeficiente de concordância de Kendall como significativo, ou seja, existe evidência de que os especialistas concordam entre si.

Conforme expõe a Tabela 4-2 para um coeficiente de concordância obtido no valor de Kendall = 0,6724, temos para o FMEA a classificação como CONSIDERÁVEL no quesito RPN.

Tabela 4-16 Coeficiente de Kendall para o RPN

Coeficiente de Kendall	Chi - Qd	DF	P
0,6724	68,5529	17	0,0000

Então, compreendendo-se as análises desta seção para o RPN, diz-se que apresenta concordância estatística do produto das avaliações para a Severidade, Ocorrência e Detecção pelos observadores, através do seu produto RPN. Segundo o índice de Kendall significativo, classifica-se o FMEA, quanto ao RPN, como CONSIDERÁVEL.

4.2.2.5 Conclusões sobre o FMEA tradicional

Para a análise de concordância aplicada ao FMEA tradicional desenvolvido por Helvacioğlu e Ozen (2014) a estatística de Fleiss' Kappa e Kendall permitiu classificá-lo como CONSIDERÁVEL, para as avaliações da Severidade, Ocorrência e RPN e, a única exceção de classificação, foi FMEA INACEITÁVEL para a Detecção.

Além de permitir classificar o FMEA, pode-se dizer que esses resultados nos alertam sobre o desempenho de especialistas avaliando o FMEA tradicional. A partir do estudado nesta seção, pode-se concluir que a análise por GR&R atributo pode auxiliar a identificar os índices de prioridade de risco que não apresentam consentimento dentre os avaliadores e são problemáticos.

Sabendo dessas deficiências do FMEA é possível tomar atitudes para que a concordância das opiniões dos avaliadores seja melhorada. Por exemplo, esse tipo de análise sugere que o FMEA desta seção deve ser revisto com relação as avaliações dos seis especialistas para a Ocorrência e Detecção. Os resultados e análises também sugerem que os modos de falha não estão bem definidos e/ou os critérios adotados precisam ser rediscutidos para que o FMEA alcance o seu objetivo, cujo é priorizar os riscos mais relevantes para a organização de maneira confiável.

4.3 CASO 2 - Análise estatística do FMEA FMAGDM

A fonte de informação para avaliação estatística deste modelo de FMEA FMAGDM (*Fuzzy Multi-Attribute Group Decision Making*) é baseada no trabalho de Helvacioğlu e Ozen

(2014), que *a posteriori* da análise do FMEA Tradicional apresentada no Capítulo anterior 4.2, também adotaram o modelo FMEA FMAGDM para ranquear a prioridade de risco dos modos de falha do problema em questão. É importante destacar que os mesmos modos de falha analisados por meio do FMEA tradicional foram projetados para serem analisados pelos mesmos avaliadores especialistas, nas mesmas condições, mas através do sistema FMAGDM.

O FMEA FMAGDM é um modelo de análise robusto que emprega aos conceitos de lógica difusa (Fuzzy) e análise multi-critério, inclusive para variáveis do tipo atributos, com o intuito de auxiliar a tomada de decisão.

Nos próximos Capítulos, apresenta-se a análise por GR&R atributo do FMEA FMAGDM, assim como, comentários e discussões realizados ao longo das seções e, na última parte, os resultados dessas análises quanto a subjetividade do FMEA.

4.3.1 Base de dados do FMEA FMAGDM

Assim como destacado no Capítulo anterior, os dados de análise do FMAGDM FMEA são oriundos do trabalho de Helvacioğlu e Ozen (2014) pelos mesmos especialistas que avaliaram o FMEA Tradicional, mas utilizando-se novo modelo de FMEA. O banco de dados está disponível na Tabela 4-17.

Nesta obra, iremos utilizar somente as informações pertinentes à análise do FMEA FMAGDM do trabalho original de Helvacioğlu e Ozen (2014), isto é, a parte de análise multicritério para classificar o RPN dos modos de falha do artigo original não será abordada por não fazer parte do escopo deste trabalho e não interferir nas análises, pois é uma fase posterior ao processo de avaliação, que é o foco dessa Tese.

As demais informações do projeto e as referências ao processo de construção do FMEA FMAGDM, bem como o seu desenvolvimento e aplicação no projeto de iates pode ser conferido diretamente na publicação de Helvacioğlu e Ozen (2014).

Tabela 4-17 Tabela de atributo de classificação FMEA FMAGDM

Modos de falha	AVALIADOR 1			AVALIADOR 2			AVALIADOR 3			AVALIADOR 4			AVALIADOR 5			AVALIADOR 6		
	S	O	D	S	O	D	S	O	D	S	O	D	S	O	D	S	O	D
1	(7, 8, 9)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)
1A	(4, 5, 6)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(4, 5, 6)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(4, 5, 6)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)
2	(7, 8, 9)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(3, 4, 5)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)
2A	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(7, 8, 9)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)
3	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)
3A	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(3, 4, 6, 7)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)
3B	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)
4	(5, 6, 7)	(3, 4, 6, 7)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(3, 4, 6, 7)	(2, 3, 4)	(4, 5, 6)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)
5	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)
6	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 1, 2)	(3, 4, 5)
6A	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 2, 3, 4)	(3, 4, 5)
7	(4, 5, 6)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)
7A	(5, 6, 7)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)
8	(6, 7, 8)	(3, 4, 6, 7)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(3, 4, 5)
8A	(5, 6, 7)	(3, 4, 6, 7)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)
8B	(6, 7, 8)	(3, 4, 6, 7)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(5, 6, 7)	(1, 2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(3, 4, 5)	(1, 2, 3, 4)	(3, 4, 5)	(5, 6, 7)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)
9	(4, 5, 6)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(6, 7, 8)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)
10	(6, 7, 8)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 2, 3, 4)	(2, 3, 4)	(7, 8, 9)	(1, 1, 2)	(2, 3, 4)

Fonte: adaptado de Helvacioğlu e Ozen (2014)

4.3.2 Análise dos Resultados: FMEA FMAGDM

A análise do FMEA FMAGDM através de GR&R por atributos também está baseada na estrutura discutida na seção introdutória anterior 4.2. O objetivo desta avaliação é investigar se a metodologia FMEA FMAGDM apresenta a concordância e medir o grau de confiabilidade das avaliações dos especialistas.

As três variáveis resposta do FMEA (Severidade, Ocorrência e Detecção) foram pontuadas através da métrica variável FMAGDM, aplicada no artigo de Helvacioğlu e Ozen (2014). Neste método, a análise de concordância tem a limitação de cálculo somente do RPN, pois o FMEA FMAGDM envolve diversas etapas que não permitem a análise estatística de cada uma das variáveis do FMEA. Dessa maneira, é possível aplicar a metodologia de análise de concordância somente com números *defuzzificados*, nesse caso, o RPN calculado para cada um dos modos de falha avaliado pelos seis especialistas. Para isto, detalhamos em um Capítulo específico 4.3.2.1 as etapas do tratamento dos dados para balizar as informações e avaliações de maneira que permita a análise de concordância junto ao FMEA FMAGDM com o pacote de ferramentas do MSA por atributos.

Conforme estabelecido no Capítulo 4.4.3, as referências para classificações do FMEA foram apresentadas na Tabela 4-1 e Tabela 4-2, para o coeficiente de Fleiss' Kappa e Kendall, respectivamente. No artigo dos autores não foram conduzidas avaliações com repetições para cada um dos índices, portanto, aplica-se a análise GR&R para investigar exclusivamente a grandeza de Reprodutibilidade e diagnosticar a análise de concordância dentre os observadores (*Between*).

4.3.2.1 Desenvolvimento da Análise

A análise do FMEA FMAGDM desenvolvida neste trabalho teve que abordar técnicas diferentes para que fosse possível a análise de concordância, utilizou-se metodologias integradas que tratam o tipo de dado que são gerados pela lógica Fuzzy Multi-Critérios, cujos são número *meta-fuzzificados* de acordo com pesos geometricamente distribuídos. Os números devidamente ajustados são os parâmetros de entrada para a análise estatística por concordância.

O tratamento dos dados inicia-se após as etapas de entrada de dados e sua *fuzzificação*, que são análogas as do trabalho de referência de Helvacioğlu e Ozen (2014). Mas, os processos

de inferência, saída Fuzzy e *defuzzificação*, foram especialmente desenvolvidos para que possibilitassem analisar o tipo FMEA FMAGDM. A Figura 4-1 ilustra as etapas que compreendem o sistema FMEA FMAGDM até a saída de números Crisp, ou seja, valores que permitem analisar estatisticamente a concordância com MSA.



Figura 4-1 Etapas de análise do sistema FMEA FMAGDM

A primeira etapa é a entrada de dados, chamada de números *crisp*, que é a tradução das opiniões dos especialistas para construir as escalas dos índices de risco, análoga a primeira etapa do FMEA tradicional. Essas escalas são utilizadas como base do processo de pesos e *fuzzificação* multicritério, o que proporciona a construção das funções do FMEA FMAGDM. No trabalho Helvacioğlu e Ozen (2014), as funções escolhidas para a Severidade e Detecção foram triangulares e para a Ocorrência, trapezoidais. As duas etapas estão discutidas detalhadamente no artigo de referência de Helvacioğlu e Ozen (2014).

Na etapa de inferência, temos a tabulação das notas FMAGDM conferidas pelos seis especialistas para cada um dos 18 modos de falha. Em seguida, realizou-se a multiplicação dos índices de *Severidade (S) x Ocorrência (O) x Detecção (D)*, segundo Kaufmann e Gupta (1991), que propõem a multiplicação de números Fuzzy Multi-critério baseada na geometria Fuzzy original dos números.

O produto dessa multiplicação são funções trapezoidais, chamadas de RPN-Fuzzy, exibidas na Tabela 4-18 Tabela de RPN-Fuzzy trapezoidal (parte 1) e na Tabela 4-19 Tabela de RPN-Fuzzy trapezoidal (parte 2). Essas funções foram escalonadas, pois não podem ser utilizadas diretamente para estabelecer as prioridades de riscos dos modos de falha do FMEA FMAGDM. A partir disso, foram chamadas de saída Fuzzy e já podem ser finalmente *defuzzificadas*.

Tabela 4-18 Tabela de RPN-Fuzzy trapezoidal (parte 1)

Modos de falha	Avaliador 1				Avaliador 2				Avaliador 3			
1	14	24	72		14	24	72		12	21	64	
1A	8	30	60	96	8	15	48		8	15	48	
2	14	24	72		12	21	64		12	21	64	
2A	21	64	96	180	14	24	72		14	48	72	144
3	14	48	72	144	14	48	72	144	14	24	72	
3A	14	48	72	144	14	48	72	144	14	48	72	144
3B	14	48	72	144	14	48	72	144	18	56	84	160
4	30	72	108	196	18	56	84	160	12	21	64	
5	12	42	63	128	12	42	63	128	12	42	63	128
6	12	42	63	128	10	18	56		10	18	56	
6A	18	56	84	160	12	21	64		12	21	64	
7	8	30	45	96	10	18	56		10	18	56	
7A	10	36	54	112	10	18	56		10	18	56	
8	36	84	126	224	21	64	96	180	14	48	72	144
8A	30	72	108	196	14	48	72	144	14	48	72	144
8B	36	84	126	224	12	42	63	128	12	42	63	128
9	8	30	45	96	12	21	64		12	21	64	
10	12	42	63	128	14	24	72		14	24	72	

Tabela 4-19 Tabela de RPN-Fuzzy trapezoidal (parte 2)

Modos de falha	Avaliador 4				Avaliador 5				Avaliador 6			
1	14	24	72		14	24	72		12	21	64	
1A	6	24	36	80	6	24	45	80	6	24	36	80
2	18	28	80		12	21	64		12	21	64	
2A	12	42	63	128	14	24	72		14	48	72	144
3	18	56	84	160	12	42	63	128	12	42	63	128
3A	14	48	72	144	30	72	108	196	10	36	54	112
3B	12	21	64		14	48	72	144	14	48	72	144
4	12	21	64		30	72	108	196	8	30	45	96
5	14	48	72	144	12	42	63	128	10	36	54	112
6	10	18	56		10	18	56		15	24	70	
6A	12	21	64		12	42	63	128	15	48	72	140
7	10	18	56		10	36	54	112	10	36	54	112
7A	10	18	56		10	36	54	112	10	18	56	
8	18	56	84	160	14	48	72	144	18	28	80	
8A	12	42	63	128	14	48	72	144	14	48	72	144
8B	15	48	72	140	9	32	48	100	10	36	54	112
9	12	21	64		12	42	63	128	12	21	64	
10	14	24	72		14	48	72	144	14	24	72	

O processo de *defuzificação* tem o objetivo de transformar as funções Fuzzy FMAGDM obtidas em números em reais, ou seja, retorná-los à condição inicial de números *crisp*. Desenvolveu-se a operação de dados através do software MATLAB® e suas bibliotecas de

cálculo e controle FMAGDM. O método de *defuzzificação* escolhido foi por centroide (centro de gravidade), que é a abordagem mais utilizada para obter-se números *crisp* consistentes (WANG *et al.*, 2009).

Por fim, temos na Tabela 4-20 a nota *defuzzificada* do método FMEA FMAGDM que cada um dos seis especialistas atribuiu para cada modo de falha. Esses dados finalmente podem ser utilizados para análise de concordância, elaborada por meio do software Minitab®.

Tabela 4-20 Tabela RPN defuzzificado

Modos de falha	AVALIADOR 1	AVALIADOR 2	AVALIADOR 3	AVALIADOR 4	AVALIADOR 5	AVALIADOR 6
1	0.5093	0.5093	0.5052	0.5093	0.5093	0.5052
1A	0.4661	0.4931	0.4931	0.4563	0.4563	0.4563
2	0.4444	0.5052	0.5052	0.5250	0.5052	0.5052
2A	0.5014	0.5093	0.4826	0.4785	0.5093	0.4826
3	0.4361	0.4826	0.5972	0.4969	0.4785	0.4785
3A	0.4361	0.4826	0.4826	0.4826	0.5179	0.4732
3B	0.4361	0.4826	0.4969	0.5052	0.4826	0.4826
4	0.5417	0.4969	0.5952	0.5052	0.5179	0.4661
5	0.4125	0.4785	0.4785	0.4826	0.4785	0.4732
6	0.4125	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5190
6A	0.4694	0.5052	0.5052	0.5052	0.4785	0.4911
7	0.3653	0.5000	0.5000	0.5000	0.4732	0.4732
7A	0.3889	0.5000	0.5000	0.5000	0.4732	0.5000
8	0.5917	0.5014	0.4826	0.4969	0.4826	0.5250
8A	0.5417	0.4826	0.4826	0.4785	0.4826	0.4826
8B	0.5917	0.4785	0.4785	0.4911	0.4725	0.4732
9	0.3653	0.5052	0.5052	0.5052	0.4785	0.5052
10	0.4125	0.5093	0.5093	0.5093	0.4826	0.5093

4.3.2.2 Análise de concordância aplicada ao FMEA FMAGDM

Conforme visto nas etapas anteriores, devido a limitações do método FMEA FMAGDM, a análise de concordância entre os observadores somente foi realizada para o RPN final, ou seja, não é possível analisar o sistema de notas atribuídas em cada um dos índices de Severidade, Ocorrência e Detecção. Essa limitação decorre do próprio algoritmo FMAGDM que só deve ser *defuzzificada* após as operações aritméticas.

A Tabela 4-21 exhibe o ICC com o número de combinação das avaliações dos especialistas utilizando o método FMEA FMAGDM de todas as avaliações dos 18 modos de falha, apenas em um deles todos os seis especialistas concordaram exatamente, ou seja, 5,56%.

Tabela 4-21 Análise de Concordância

Avaliações	#Combinadas	Porcentagem	95% IC
18	1	5,56	(0,14, 27,29)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

A Tabela 4-22 apresenta a análise dos itens avaliados através do método de Fleiss' Kappa. Para a significância do índice, temos que $p - valor < 0,05$ e isto aponta que o sistema exibe concordância estatística. Observando-se o índice de Fleiss' Kappa global = 0,1867, tem-se que a concordância dos avaliadores em relação ao FMEA é LEVE, conforme Tabela 4-1.

Tabela 4-22 Coeficiente de Fleiss' Kappa para o FMEA FMAGDM

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
0,4727	0,1849	0,0608	3,0383	0,0012
0,4823	-0,0285	0,0608	-0,4694	0,6806
0,4886	0,1849	0,0608	3,0383	0,0012
0,4889	-0,0093	0,0608	-0,1535	0,5610
0,4893	0,0529	0,0608	0,8692	0,1924
0,4909	-0,0093	0,0608	-0,1535	0,5610
0,4946	0,1136	0,0608	1,8679	0,0309
0,4987	0,2881	0,0608	4,7353	0,0000
0,5054	0,2987	0,0608	4,9092	0,0000
0,5057	-0,0188	0,0608	-0,3100	0,6217
0,5091	-0,0093	0,0608	-0,1535	0,5610
0,5100	-0,0485	0,0608	-0,7976	0,7875
0,5116	0,3625	0,0608	5,9564	0,0000
0,5134	-0,0188	0,0608	-0,3100	0,6217
0,5207	-0,0093	0,0608	-0,1535	0,5610
0,5249	-0,0188	0,0608	-0,3100	0,6217
0,5278	0,0653	0,0608	1,0743	0,1413
0,5336	-0,0188	0,0608	-0,3100	0,6217
Global	0,1804	0,0226	7,9543	0,0000

Em seguida, realizou-se a análise do coeficiente de Kendall. A partir da Tabela 4-23, considerando $DF = 17$ e $\alpha = 0,05$, o sistema FMEA FMAGDM $\text{Chi - quadrado}_{\text{Fuzzy-FMEA}} = 36,3144$ apresenta $\text{Chi - quadrado}_{\text{crítico}} (X^2) = 27,5871$, e $p - valor < 0,05$. Assim, tem-se $\text{Chi - quadrado}_{\text{FDAGDM-FMEA}} > \text{Chi - quadrado}_{\text{crítico}}$ e, portanto, pode-se concluir que o coeficiente de concordância de Kendall é significativo, pois existe evidência de que os especialistas concordam entre si.

Tabela 4-23 Coeficiente de Kendall para o FMEA FMAGDM

Coeficiente de Kendall	Chi - Qd	DF	P
0,3560	36,3144	17	0,0042

Em vista disso, analisando-se a Tabela 4-2, o coeficiente de concordância Kendall = 0,3560 e, com nesse valor, o FMEA é classificado como em estado de ATENÇÃO – REVISÃO.

Segundo a análise estatística desta seção, a metodologia FMEA FMAGDM apresenta concordância significativa entre os avaliadores para as duas estatísticas empregadas. Mas, o grau de concordância, isto é, a força com que os avaliadores concordam entre eles não é forte, o que afeta o FMEA em termos da consistência que deve existir na utilização da ferramenta. Esse resultado, por conseguinte, aponta que existe subjetividade dos avaliadores durante o processo de atribuição das notas aos modos de falha deste FMEA.

4.3.2.3 Conclusões sobre o FMEA FMAGDM

Motivado pelas pesquisas recentes que indicam que o FMEA tradicional apresenta questões subjetivas relacionadas ao grau de concordância entre os avaliadores que o desenvolvem, bem como pela tendência de se utilizar o FMEA FMAGDM ao invés do FMEA tradicional, pois *a priori* proporciona benefícios conforme apresentado no Capítulo 2.4.8 de revisão do estado da arte, nesta seção da pesquisa, pode-se analisar e comparar se de fato o FMEA FMAGDM atenua ou até mesmo elimina a subjetividade encontrada no FMEA.

Por meio da análise de concordância examinada pelos coeficientes de Fleiss' Kappa e Kendall, nesta seção de análise do FMEA FMAGDM, constatou-se que o FMEA é uma ferramenta subjetiva, e este é um dos pontos fracos da ferramenta. O sistema FMAGDM integrado não trouxe grandes benefícios ao FMEA, pois os índices estudados apontam que o FMEA apresenta concordância entre seus avaliadores, mas que não são fortes. Segundo índice de Fleiss' Kappa, o FMEA tem concordância LEVE e através do índice de Kendall conclui-se que o FMEA está em estado de ATENÇÃO -REVISÃO.

Algumas hipóteses podem ser levantadas a respeito das divergências nas avaliações dos especialistas, possivelmente, pelo fato dos avaliadores não conseguirem distinguir entre os diferentes níveis de classificação de maneira objetiva do FMEA FMAGDM, isto é, os especialistas não conseguem pontuar corretamente por não partirem dos mesmos princípios dos outros avaliadores ou não terem referência de utilização da escala.

Os resultados calculados comprometem a fidedignidade e a qualidade do FMEA FMAGDM quanto a confiabilidade dos seus resultados, ainda mais comparado ao método

FMEA tradicional, pois não há apresenta diferença significativa de melhoria na confiabilidade estatística.

Portanto, a análise dos resultados nos permite concluir que o método utilizado não soluciona os problemas de subjetividade do FMEA e, pelo contrário, indica que é ainda mais impreciso em suas avaliações.

4.4 CASO 3 - Análise estatística do FMEA Experimental

Para o estudo do sistema de medição de Reprodutividade e Repetitividade, adaptou-se o FMEA, através de um caso experimental na empresa MAHLE. O experimento foi planejado para avaliar a variabilidade existente entre diferentes especialistas e entre os diversos modos de falhas durante o processo de elaboração do FMEA. Para isto, desenvolveu-se um FMEA Tradicional, mas que possibilitasse avaliar essa variabilidade dos avaliadores através da análise de GR&R, chamado de FMEA Experimental.

4.4.1 Desenvolvimento do FMEA

Utilizou-se três especialistas que analisaram cinco conjuntos de modos de falha/efeito/causa com três repetições. Essa combinação gerou quinze análises para cada um dos especialistas, divididos em três FMEA's com a mesma abordagem.

Referente ao conteúdo do FMEA não houve alterações, isto é, um FMEA de processo foi preparado, visando a análise em ambiente distorcido, em relação aos problemas durante o processo de uma metalúrgica. O objetivo do FMEA aplicado é classificar os modos de falha mais críticos do processo de metalização por plasma, dos quais selecionou-se cinco modos de falha, contendo apenas um efeito e causa, com seus respectivos métodos de controle conforme o Anexo A.

Após a preparação do FMEA, selecionou-se o time de avaliadores para pontuar os modos de falha quanto a Severidade, Ocorrência e Detecção, com os seguintes perfis:

- Um analista de qualidade que trabalha com atendimento ao cliente com conhecimento sobre o processo, mas sem treinamento no FMEA, identificado por A.
- Um engenheiro de processos que possui conhecimento sobre o processo e treinado em FMEA, identificado por B.

- Um engenheiro industrial que possui conhecimento sobre o processo e treinado em FMEA, identificado por C.

Dessa maneira, buscou-se construir uma equipe de avaliadores que abrangesse perspectivas diferentes para classificar o FMEA, com domínio e experiência nesse processo.

4.4.2 Coleta dos dados do experimento

O FMEA aplicado teve a ordem dos modos de falha aleatorizada, com um total tem 45 experimentos para analisá-lo como sistema de medição, em relação aos índices de Severidade, Ocorrência, Detecção e índice de prioridade de risco (RPN).

Com relação a frequência do experimento, um intervalo de 2 e 3 semanas foi estabelecido a partir do primeiro FMEA experimental, respectivamente, para estabelecer a atribuição dos conceitos ao FMEA e garantir o estudo de repetitividade. O resultado do processo de pontuação por parte dos especialistas está apresentado nas tabelas a seguir, nas quais a Tabela 4-24 é o resultado do primeiro FMEA realizado, a Tabela 4-25 apresenta o segundo FMEA e a Tabela 4-26 apresenta o último experimento FMEA.

Tabela 4-24 FMEA Experimental 1

Modo de falha	Avaliador	Índice de Risco			RPN
		Severidade	Ocorrência	Detecção	
1	A	8	2	1	16
1	B	7	4	9	252
1	C	5	5	4	100
2	A	8	4	4	128
2	B	7	2	8	112
2	C	7	4	4	112
3	A	9	3	5	135
3	B	8	2	8	128
3	C	8	4	4	128
4	A	7	2	4	56
4	B	7	4	1	28
4	C	7	7	4	196
5	A	8	5	3	120
5	B	7	2	8	112
5	C	7	7	6	294

Tabela 4-25 FMEA Experimental 2

Modo de falha	Avaliador	Índice de Risco			RPN
		Severidade	Ocorrência	Detecção	
1	A	7	2	5	70
1	B	7	2	5	70
1	C	4	6	3	72
2	A	7	2	2	28
2	B	7	1	6	42
2	C	7	4	3	84
3	A	9	2	2	36
3	B	10	4	6	240
3	C	7	3	3	63
4	A	8	6	6	288
4	B	7	1	6	42
4	C	6	4	3	72
5	A	8	6	3	144
5	B	7	2	6	84
5	C	6	5	5	150

Tabela 4-26 FMEA Experimental 3

Modo de falha	Avaliador	Índice de Risco			RPN
		Severidade	Ocorrência	Detecção	
1	A	5	2	2	20
1	B	7	2	5	70
1	C	6	4	5	120
2	A	7	1	1	7
2	B	7	2	7	98
2	C	7	6	4	168
3	A	9	4	4	144
3	B	9	2	8	144
3	C	8	4	5	160
4	A	5	2	2	20
4	B	7	4	5	140
4	C	6	6	2	72
5	A	5	6	2	60
5	B	7	2	7	98
5	C	6	4	4	96

4.4.3 Análise dos dados

Analisou-se as quatro variáveis resposta do FMEA como sistema de medição, tomando-se cada índice de pontuação como uma métrica variável por atributo discreta, na respectiva ordem:

- Severidade
- Ocorrência
- Detecção
- RPN: Índice de prioridade de risco

Para cada um dos índices acima, o FMEA modificado terá a análise *GR&R* dividida em duas partes:

- ✓ Repetitividade: Análise de Concordância entre observador (*Within*)
- ✓ Reprodutividade: Análise de Concordância dentre os observadores (*Between*)

A primeira análise está voltada para examinar o desempenho individual dos avaliadores consigo mesmo, ou seja, a atuação de Repetitividade dentro (*Within*) dos avaliadores. Já o segundo conjunto de análise está relacionado com o desempenho de Reprodutividade em conjunto dos avaliadores, ou seja, o exame do comportamento do time de avaliadores entre eles (*Between*).

4.4.3.1 Severidade

A análise de repetitividade detalhada do processo real introduzida ao FMEA é apresentada a seguir iniciando-se através da análise de Severidade dos modos de falha.

4.4.3.1.1 Análise de Concordância entre observador (*Within*)

A análise de concordância entre observador pode ser analisada através do *Run Chart* exibido na Figura 4-2, que apresenta os resultados das avaliações de Severidade para cada modo de falha, por cada um dos especialistas em suas três repetições.

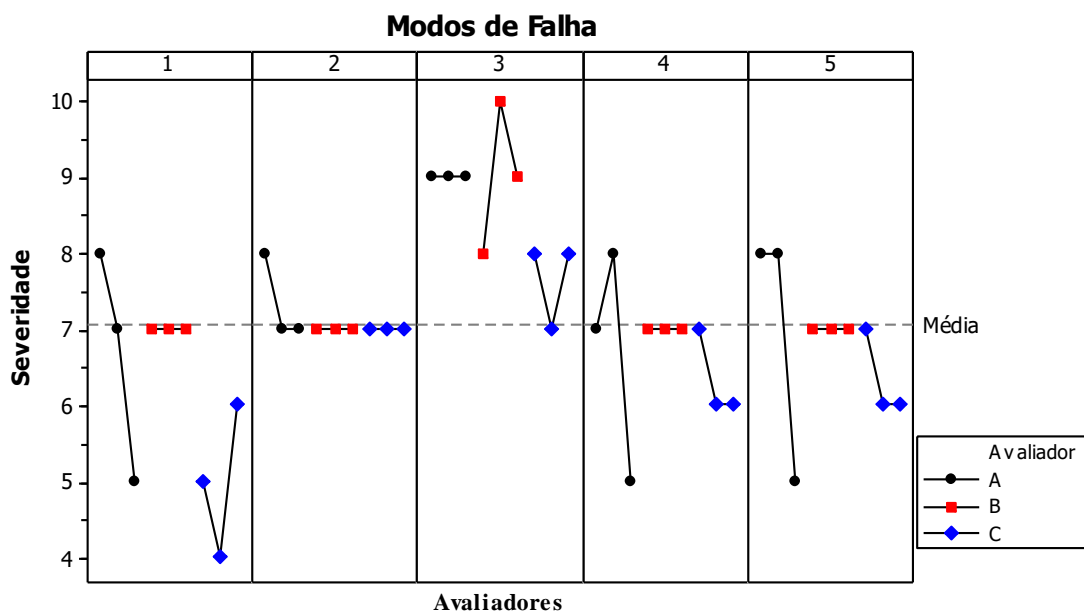


Figura 4-2 Gráfico de pontuações para a Severidade

Através desse gráfico, observa-se que o engenheiro de processos (B) tem variabilidade menor durante o processo de pontuação, enquanto que os outros dois operadores A e C, tem maior variação de suas pontuações para um mesmo modo de falha. Em síntese, a análise da Figura 4-2 permite concluir que as pontuações dos modos de falha pelos especialistas A e C, têm grandes variações, comparando-se ao especialista B, que obteve menor variação.

Estes dados representam a variabilidade causada pelo especialista (operador) e pelo conjunto modo de falha/efeito/causa (peça). Portanto, no que diz respeito à severidade, pode-se dizer que as maiores contribuições para a oscilação foram do analista da qualidade (A) e engenheiro de processos (C) atribuindo notas aos conjuntos de modos de falha 1, 2, 3, 4 e 5.

Tabela 4-27 Análise de concordância para a Severidade (*Within*)

Avaliadores	#Inspeccionados	#Combinado	Porcentagem	IC 95%
A	5	1	20,00	(0,51 ; 71,64)
B	5	4	80,00	(28,36 ; 99,49)
C	5	1	20,00	(0,51 ; 71,64)

Combinado: avaliador concorda com ele mesmo em todos os ensaios

A primeira análise estatística para examinar o nível de concordância é o ICC para uma inferência primária das avaliações e concordâncias dos especialistas consigo mesmo (*Within*), apresentados na Tabela 4-27. Então, como pode-se observar na Tabela 4-27, o avaliador B foi o que obteve melhor desempenho, no qual suas respostas foram iguais as demais em 4 das 5

avaliações, ou seja, 80% de concordância. O avaliador A, apenas manteve a mesma opinião em um dos efeitos de falha ao longo das cinco análises, com nível de concordância de 20%, bem como o desempenho do avaliador B. A Figura 4-3 traz as informações anteriores e ilustra o nível de concordância entre avaliador dentro do intervalo de confiança de 95%.

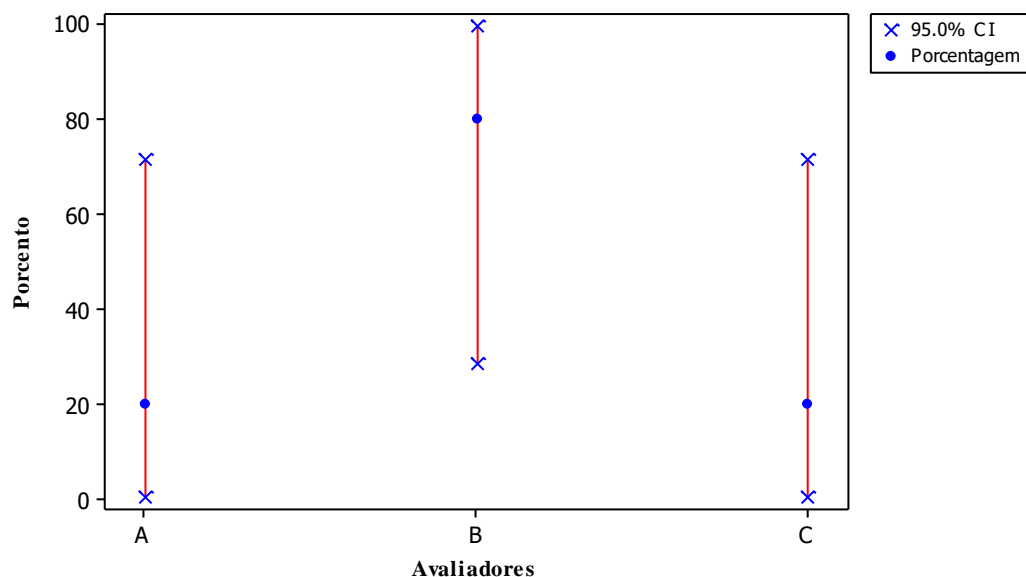


Figura 4-3 Nível de concordância entre avaliador para a Severidade

A estatística de concordância de Fleiss' Kappa foi calculada para o índice de severidade e está presente na Tabela 4-28. Vale lembrar, que o coeficiente de Fleiss' Kappa por ser uma avaliação muito criteriosa é conveniente para realizar a análise direta do FMEA, pois não leva em consideração a sua escala de classificação, apenas se a opinião do especialista foi a mesma durante os três experimentos ou não.

Sabendo disso, pode-se conferir na Tabela 4-28 as notas atribuídas por cada um dos avaliadores, e o índice global de Fleiss' Kappa, que imprime o nível de concordância durante as três avaliações dos modos de falha com relação à severidade.

Analisando-se os cálculos, observa-se que todos os avaliadores tiveram dificuldades em atribuir as notas. Realizando-se a análise individual do desempenho dos especialistas, nota-se que o avaliador A, bem como o C, não alcançaram nível significativo do coeficiente de Fleiss' Kappa global. Confere-se na Tabela 4-28 para o especialista A, $p - valor = 0,2621$ e para o C, $p - valor = 0,1743$, isto é, para ambos $p - valor > 0,05$, sendo assim, classifica-se, segundo a Tabela 4-1, de acordo com o Capítulo 4.1.1, que **NÃO HÁ CONCORDÂNCIA** dos especialistas em termos de Repetitividade.

No entanto, não ocorreu o mesmo com o engenheiro de processos (avaliador B), cujas classificações foram significativas, com $p - valor = 0,0074$, ou seja, $p - valor < 0,05$. O seu coeficiente de concordância de *Fleiss' Kappa Global* = 0,4231, segundo a Tabela 4-2 é classificado como MODERADO.

Tabela 4-28 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Severidade (*Within*)

Avaliador	Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor	
A	4	*	*	*	*	
	5	-0,2500	0,2581	-0,9682	0,8335	
	6	*	*	*	*	
	7	-0,0227	0,2582	-0,0880	0,5351	
	8	-0,2000	0,2582	-0,7746	0,7807	
	9	1,0000	0,2582	3,8729	0,0001	
	10	*	*	*	*	
	Global	0,0964	0,151332	0,63692	0,2621	
	B	4	*	*	*	*
		5	*	*	*	*
6		*	*	*	*	
7		1,0000	0,2582	3,8729	0,0001	
8		-0,0714	0,2581	-0,2766	0,6090	
9		-0,0714	0,2581	-0,2766	0,6090	
10		-0,0714	0,2581	-0,2766	0,6090	
Global		0,4231	0,1737	2,4354	0,0074	
C		4	-0,0714	0,2581	-0,2766	0,6090
		5	-0,0714	0,2581	-0,2766	0,6090
	6	0,1000	0,2581	0,3873	0,3493	
	7	0,1666	0,2581	0,6455	0,2593	
	8	0,4230	0,2581	1,6385	0,0507	
	9	*	*	*	*	
	10	*	*	*	*	
	Global	0,1456	0,1553	0,9372	0,1743	

* Quando nenhum valor ou todas as respostas através da análise não foram atribuídos, Kappa não pode ser calculado.

Para ser capaz de conhecer a destreza de Repetitividade dos especialistas entre eles, a análise do coeficiente de concordância de Kendall também é importante, conforme Capítulo 2.6.5.2.4 de revisão da literatura. Levando em consideração o nível de significância adotado, para esse estudo $\alpha = 0,05\%$, bem como os graus de liberdade dos experimentos, $DF = 4$, de onde temos Chi – quadrado_{crítico} (X^2) = 9,4877.

Observando-se Tabela 4-29, o analista A apresenta Chi – quadrado_{severidade} < Chi – quadrado_{crítico}, em outras palavras, o índice de Kendall de 0,6533 obtido não é considerado significativo e, com isso, não apresenta concordância durante o processo individual de avaliação nos três experimentos realizados. Já para os analistas B e C, temos $P - valor$

significativo ($p - valor < 0,05$) e $Chi - Qd > Chi - Qd_{crítico}$. De acordo com os cálculos abaixo, sobre a análise de concordância entre avaliador, pode-se dizer que não são uniformes. Com exceção apenas do analista de qualidade (A), o engenheiro de processos (B) e o engenheiro industrial (C) concordaram consigo mesmo.

Tabela 4-29 Coeficiente de Kendall para a Severidade (*Within*)

Avaliador	Coeficiente	Chi - Qd	DF	P-valor
A	0,6533	7,84	4	0,0976
B	1,0000	12,00	4	0,0174
C	0,8800	10,56	4	0,0320

Analisando-se o índice de Kendall para a Severidade, de acordo com a Tabela 4-2 de classificação do FMEA por Kendall, tem-se que o avaliador C alcançou o nível de aceitabilidade BOM, com índice de *Kendall* = 0,8800. O especialista B atingiu o máximo coeficiente, obtendo-se *Kendall* = 1, que expressa total concordância consigo mesmo (*Within*), classificando-se como EXCELENTE, enquanto o analista A teve seu desempenho classificado como INACEITÁVEL.

Do ponto de vista da análise do sistema de medição do índice de Severidade, diz-se que o procedimento de avaliação deve ser discutido para sua padronização, isso porque, os especialistas A e C, deveriam receber treinamentos para melhorar os critérios, em especial, o analista A, que não conseguiu repetir suas análises nos três experimentos.

4.4.3.1.2 Análise de Concordância dentre os observadores (*Between*)

A análise de concordância dentre os observadores (*Between*) inicia-se na Tabela 4-30 com o ICC, onde a porcentagem de combinações é 0%.

Tabela 4-30 Análise de Concordância para a Severidade (*Between*)

Avaliações	#Combinadas	Porcentagem	95% IC
5	0	0,00	(0,00, 45,07)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

Observando-se a Tabela 4-31 a seguir, pode-se ver que P-valor < 0,05, ou seja, o coeficiente de Fleiss' Kappa apresenta significância e os especialistas concordam entre eles.

Tabela 4-31 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Severidade (*Between*)

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
4	-0,0227	0,0745	-0,3049	0,6198
5	-0,0289	0,0745	-0,3885	0,6512
6	-0,0125	0,0745	-0,1677	0,5666
7	0,1551	0,0745	2,0814	0,0187
8	-0,0641	0,0745	-0,8611	0,8054
9	0,3140	0,0745	4,2130	0,0000
10	-0,0227	0,0745	-0,3042	0,6198
Global	0,0717	0,0396	1,8077	0,0353

Entretanto, ainda segundo a Tabela 4-31, tem-se *Fleiss' Kappa* = 0,0718, segundo a Tabela 4-1, a concordância é classificada como LEVE.

Analisando-se o coeficiente de concordância de Kendall, para a Severidade tomada em conjunto pela análise de todos os três analistas, verificou-se que é significativo o índice de Kendall para $DF = 4$ e $\alpha = 0,05$, pois obtém-se $\text{Chi - quadrado}_{\text{Severidade}} (X^2) = 26,4615$, isto é, $\text{Chi - quadrado}_{\text{Severidade}} > \text{Chi - Qd}_{\text{crítico}}$.

Tabela 4-32 Coeficiente de Kendall para a Severidade (*Between*)

Coeficiente de Kendall	Chi - Qd	DF	P
0,7350	26,4615	4	0,0000

Por fim, na análise de concordância por atributos dentre observadores, da Tabela 4-32, conferimos o cálculo para o índice de *Kendall* = 0,7350. Uma vez que é significativo, de acordo com a Tabela 4-2, o FMEA é classificado como BOM, apesar do índice de Fleiss' Kappa apontar que houve pouco consenso ao realizá-lo.

Através do coeficiente de Kendall, pode-se concluir que há evidência por GR&R atributo de que os especialistas concordam entre si e ainda é possível dizer que, apesar de não haver um padrão exato ao atribuir as notas, no geral os especialistas concordam. Assim, pode-se dizer que o FMEA Experimental tomado em conjunto para a análise da Severidade dos modos de falha é estatisticamente BOM.

4.4.3.2 Ocorrência

A análise do FMEA Experimental segue através da análise de Ocorrência dos modos de falha.

4.4.3.2.1 Análise de Concordância entre observador (*Within*)

Para a análise de concordância tem-se na Figura 4-4 o gráfico *Run Chart* da atribuição dos graus de ocorrência para o FMEA pelos especialistas durante os três processos de avaliação.

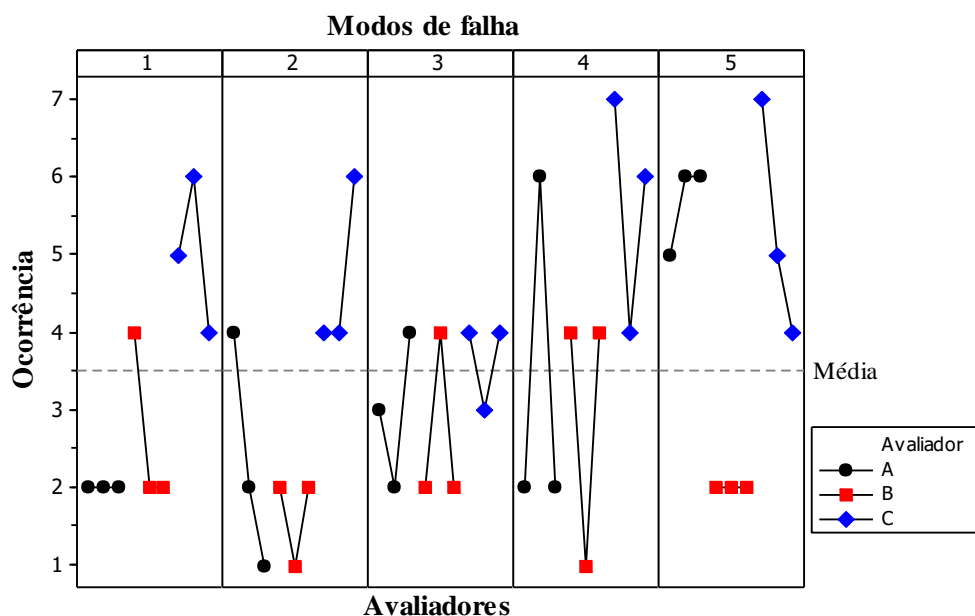


Figura 4-4 Gráfico de atribuição das notas para Ocorrência

A partir da Figura 4-4 pode-se observar que os avaliadores tiveram mudanças de opinião ao longo das semanas do experimento. A variação de opiniões também pode ser examinada por meio do ICC, exibido na Tabela 4-33.

Tabela 4-33 Análise de concordância para a Ocorrência (*Within*)

Avaliadores	#Inspeccionados	#Combinado	Porcentagem	IC 95%
A	5	1	20,00	(0,51 ; 71,64)
B	5	1	20,00	(0,51 ; 71,64)
C	5	0	0,00	(0,00 ; 45,07)

Combinado: avaliador concorda com ele mesmo em todos os ensaios

A avaliação realizada pelos operadores tem níveis baixos de concordância. Apenas os especialistas A e B mantiveram a atribuição de notas em um dos modos de falha, com o desempenho de apenas 20% de concordância no total, já o especialista C não concordou em nenhum dos experimentos com a sua própria opinião (0%). Fatos esses, que também podem ser observados na Figura 4-5, a respeito do nível de concordância entre avaliador considerando o intervalo de confiança.

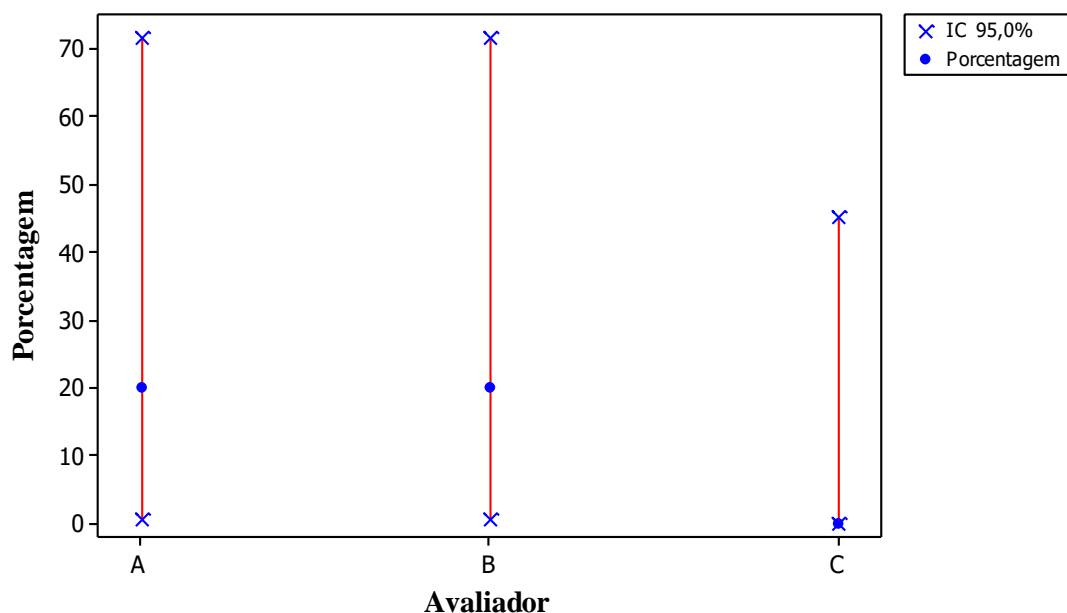


Figura 4-5 Nível de concordância entre avaliador para Ocorrência

Na Tabela 4-34 e 4-35 tem-se a análise do índice de Fleiss' Kappa, que também revela que não houve padrão de classificação entre avaliador durante o processo de análise dos modos de efeito de falha do ponto de vista da Ocorrência. Observa-se que para todos os especialistas $p - valor > 0,05$, isto quer dizer, segundo o índice Fleiss' Kappa, que o FMEA repetido pelos três especialistas não apresenta concordância e, de acordo com a matriz de classificação (vide Capítulo 4.1.1), tem-se NÃO HÁ CONCORDÂNCIA.

Tabela 4-34 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Ocorrência (*Within*) – Parte I

Avaliador	Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
A	1	-0,0714	0,2581	-0,2760	0,6090
	2	0,1964	0,2581	0,7600	0,2234
	3	-0,0714	0,2581	-0,2760	0,6090
	4	-0,1538	0,2581	-0,5950	0,7244
	5	-0,0714	0,2581	-0,2760	0,6090
	6	0,1666	0,2581	0,6450	0,2593
	7	*	*	*	*
	Global	0,0625	0,1390	0,4496	0,3265
B	1	-0,1538	0,2581	-0,5958	0,7244
	2	0,1666	0,2581	0,6455	0,2593
	3	*	*	*	*
	4	-0,0227	0,2581	-0,0880	0,5351
	6	*	*	*	*
	7	*	*	*	*
		Global	0,0322	0,1963	0,1642

* Quando nenhum valor ou todas as respostas através da análise não foram atribuídos através desse índice, Kappa

Tabela 4-35 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Ocorrência (*Within*) – Parte II

Avaliador	Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
C	1	*	*	*	*
	2	*	*	*	*
	3	-0,0714	0,2581	-0,2766	0,6090
	4	-0,3392	0,2581	-1,3140	0,9056
	5	-0,1538	0,2581	-0,5958	0,7244
	6	-0,2500	0,2581	-0,9682	0,8335
	7	-0,1538	0,2581	-0,5958	0,7244
Global	-0,2342	0,1457	-1,6067	0,9459	

* Quando nenhum valor ou todas as respostas através da análise não foram atribuídos através desse índice, Kappa

Com relação a análise da concordância entre observador pelo índice de Kendall, tem-se os resultados apresentados na Tabela 4-36 a seguir:

Tabela 4-36 Coeficiente de Kendall para a Ocorrência (*Within*)

Avaliador	Coefficiente	Chi - QdOcorrência	DF	P - valor
A	0,5471	6,5660	4	0,1607
B	0,2558	3,0697	4	0,5462
C	0,3846	4,6153	4	0,3291

Sabendo-se que o Chi – quadrado_{crítico} (X^2) = 9,4877A e observando-se a Tabela 4-36, confere-se que $Chi - QdOcorrência < Chi - Qdcrítico$, para todo os avaliadores na análise por GR&R atributo. Em outras palavras, o índice de Kendall obtido não é significativo para o desempenho de nenhum dos três especialistas.

Então, por meio da análise de concordância com índice de Kendall (*Within*), verifica-se que nenhum especialista atingiu o nível satisfatório. O especialista A alcançou $Kendall = 0,5475$, o B, $Kendall = 0,2558$ e o C, $Kendall = 0,3846$, que não são significativos estatisticamente, classificando-se o FMEA, segundo a Tabela 4-2, como INACEITÁVEL para cada um deles.

Observando-se os resultados, sem exceção de especialista, a Ocorrência dos modos de falha é duvidosa e levanta questionamentos a respeito da opinião dos profissionais escolhidos, bem como o comprometimento durante o processo de desenvolvimento do FMEA para com a sua qualidade.

4.4.3.2.2 Análise de Concordância dentre os observadores (*Between*)

Analisou-se também o nível de concordância dentre os observadores (*Between*), na qual a Tabela 4-37 demonstra o ICC, onde não houve concordância geral dos avaliadores, cujas opiniões não combinaram em nenhum dos modos de falha.

Tabela 4-37 Concordância observadores para a Ocorrência (*Between*)

Avaliações	# Combinadas	Porcentagem	95% IC
5	0	0,00	(0,00, 45,07)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

Contrariando essas premissas de que os especialistas são capazes de definir as prioridades de risco do objeto analisado (vide tabela anterior), a porcentagem de combinações é de 0% entre eles, significando que têm conceitos diferentes para os mesmos problemas, enviesando-se o resultado do FMEA.

A Tabela 4-38 apresenta a estatística de Fleiss' Kappa e pode-se conferir que a análise de concordância por atributo, por meio deste coeficiente, não é significativa, uma vez que $p - valor = 0,8425$, ou seja, $p - valor > 0,05$.

Tabela 4-38 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Ocorrência (*Between*)

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
1	0,0178	0,0745	0,2395	0,4053
2	-0,0668	0,0745	-0,8963	0,8150
3	0,0843	0,0745	1,1310	0,1290
4	-0,0546	0,0745	-0,7337	0,7684
5	0,0178	0,0745	0,2395	0,4053
6	-0,0576	0,0745	-0,7740	0,7805
7	-0,0465	0,0745	-0,6240	0,7337
Geral	-0,0386	0,0385	-1,0047	0,8425

Com este índice de Fleiss' Kappa, não houve concordância entre os avaliadores em relação aos atributos adotados, o qual não é significativo e, segundo o Capítulo 4.1.1, classifica-se o FMEA para Ocorrência como NÃO HÁ CONCORDÂNCIA.

A análise do coeficiente Kendall é mostrada na Tabela 4-39 e vê-se o $P - valor = 0,2556$, que indica que esse coeficiente não é significativo, com $Chi - quadrado_{crítico} (X^2) = 9,4877A$, ou seja, $Chi - Qd_{Ocorrência} < Chi - Qd_{crítico}$, para o conjunto de todos os avaliadores na análise por GR&R por atributos.

Então, o índice de Kendall calculado não é significativo para nenhum especialista, conforme a Tabela a seguir apresenta:

Tabela 4-39 Coeficiente de Kendall para a Ocorrência (*Between*)

Coeficiente	Chi-Quadrado Ocorrência	DF	P
0,1479	5,3243	4	0,2556

O coeficiente de concordância de Kendall para os modos de falha, com relação à Ocorrência, se fosse significativo, seria $Kendall = 0,1479$, mas os especialistas não concordaram entre si no processo de atribuição das notas da ocorrência e segundo a Tabela 4-2 o FMEA é classificado como INACEITÁVEL. Mais uma vez, o índice de Kendall obtido coloca sob suspeita o FMEA realizado, cuja confiabilidade é contestada estaticamente ao longo dos 3 FMEA Experimental.

A explicação para esse resultado é que a avaliação do FMEA é individual e fica subjetiva a cada especialista de acordo com o seu próprio ponto de vista. Além do mais, pode-se adicionar o fato de que o índice de Ocorrência seja de difícil classificação para os modos de falha, uma vez que, sendo pragmático, não houve concordância dos avaliadores consigo mesmos e, por conseguinte, também não houve concordância a nível de time.

4.4.3.3 Detecção

A Detecção dos modos de falha do FMEA Experimental também foi analisada para avaliar os coeficientes de concordância entre os especialistas por meio do GR&R atributos, que está exibido nas seções a seguir.

4.4.3.3.1 Análise de Concordância entre observador (*Within*)

A Figura 4-6 exibe a distribuição das notas de detecção para o FMEA pelos especialistas durante os três processos de avaliação do FMEA.

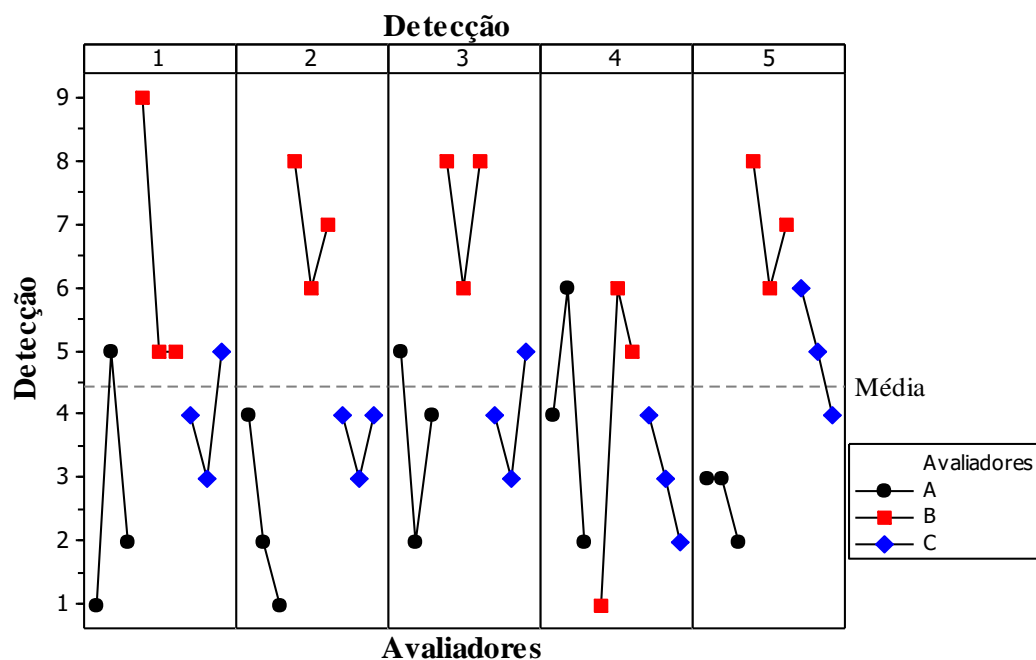


Figura 4-6 Gráfico de atribuição das notas para Detecção

Dessa figura observa-se que os operadores mudaram de opinião no decorrer dos FMEA Experimental. Essa alteração de conceitos também pode ser comprovada através do ICC exibido na Tabela 4-40, a seguir:

Tabela 4-40 Análise de concordância para Detecção

Avaliadores	#Inspeccionados	#Combinado	Porcentagem	IC 95%
A	5	0	0,00	(0,00, 45,07)
B	5	0	0,00	(0,00, 45,07)
C	5	0	0,00	(0,00, 45,07)

Combinado: avaliador concorda com ele mesmo em todos os ensaios

Os avaliadores apresentaram ainda mais divergências do que nos índices analisados anteriormente, pois a porcentagem de combinação entre suas respostas para cada um dos operadores foi 0%. Do ponto de vista da concordância, nenhum dos especialistas suportou o mesmo conceito nos experimentos FMEA, pois não se combinaram nenhuma das opiniões ao longo dos cinco modos de falha repetidos nas três avaliações que cada um dos operadores realizou.

A Figura 4-7 a seguir também aponta que não combinaram as opiniões dos operadores (0%) dentro do intervalo de confiança de 95%.

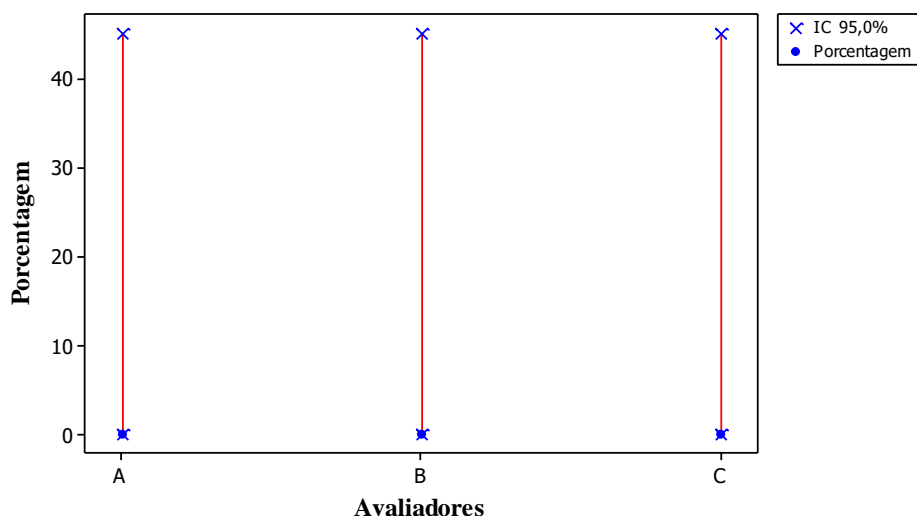


Figura 4-7 Nível de concordância entre avaliador para Detecção (Within)

Na Tabela 4-41 adiante tem-se a análise de Fleiss' Kappa, onde pode-se observar que novamente, para todos os observadores o $p - valor > 0,05$. Logo, o coeficiente calculado não é significativo, o que implica em dizer que não existe concordância.

Tabela 4-41 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Detecção (Within)

Avaliador	Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor	
A	1	-0,1538	0,2581	-0,5958	0,7244	
	2	-0,5000	0,2581	-1,9364	0,9736	
	3	0,4230	0,2581	1,6385	0,0507	
	4	-0,2500	0,2581	-0,9682	0,8335	
	5	-0,1538	0,2581	-0,5958	0,7244	
	6	-0,0714	0,2581	-0,2766	0,6090	
	7, 8 e 9	*	*	*	*	
	Global	-0,1797	0,1254	-1,4335	0,9242	
B	1	-0,0714	0,2581	-0,2766	0,6090	
	2, 3 e 4	*	*	*	*	
	5	0,1666	0,2581	0,6455	0,2593	
	6	-0,3636	0,2581	-1,4083	0,9205	
	7	-0,1538	0,2581	-0,5958	0,7244	
	8	-0,0227	0,2581	-0,0880	0,5351	
	9	-0,0714	0,2581	-0,2766	0,6090	
		Global	-0,0955	0,1284	-0,7438	0,7715
	C	1	*	*	*	*
2		-0,0714	0,2581	-0,2766	0,6090	
3		-0,3636	0,2581	-1,4083	0,9205	
4		-0,3888	0,2581	-1,5061	0,9340	
5		-0,2500	0,2581	-0,9682	0,8335	
6		-0,0714	0,2581	-0,2765	0,6090	
7, 8 e 9		*	*	*	*	
	Global	-0,2963	0,1501	-1,9734	0,9758	

* Quando nenhum valor ou todas as respostas através da análise não foram atribuídos através desse índice, Kappa não pode ser calculado.

A classificação do FMEA em relação ao índice Fleiss' Kappa, de acordo com o Capítulo 4.1.1, é NÃO HÁ CONCORDÂNCIA das avaliações.

A fim de constatar-se a falta de concordância entre observador, analisou-se também o índice de Kendall. Observando-se a Tabela 4-20, vê-se que o indicador calculado não é significativo, pois $P - valor > 0,05$ para cada um dos especialistas. Não obstante, também realizou-se o cálculo do Chi – quadrado_{crítico} (X^2) = 9,4877 e, na Tabela 4-20, pode-se verificar que $Chi - Qd_{Detecção} < Chi - Q_{dcrítico}$. De fato, o índice de Kendall calculado não é significativo para os especialistas.

Tabela 4-42 Coeficiente de Kendall para Detecção (*Within*)

Avaliador	Coeficiente	Chi-Qd _{Detecção}	DF	P-valor
A	0,2901	3,4814	4	0,4807
B	0,2954	3,5454	4	0,4710
C	0,4210	5,0526	4	0,2819

Nesse caso, o analista de qualidade alcançou $Kendall = 0,2901$, o engenheiro de processos $Kendall = 0,2954$ e o engenheiro industrial $Kendall = 0,4211$. Porém, todos estes índices são insignificantes e classificam o FMEA como INACEITÁVEL, o que mais uma vez, nota-se baixa confiabilidade destas avaliações atribuídas ao FMEA.

As classificações não foram adequadamente empregadas quando repetido o processo e pode-se dizer que a classificação quando repetida ocorre de forma deliberada, uma vez que os avaliadores não conseguem repetir com êxito os graus distribuídos, bem como manter as mesmas referências adotadas da primeira para as demais avaliações.

4.4.3.3.2 Análise de Concordância dentre os observadores (*Between*)

A porcentagem de combinações entre os especialistas é de 0%, como pode-se observar na Tabela 4-43 do ICC. Esse resultado significa que durante a atribuição das notas de detecção os três especialistas divergiram suas opiniões.

Tabela 4-43 Análise de Concordância para Detecção (*Between*)

Avaliações	# Combinadas	Porcentagem	95% IC
5	0	0,00	(0,00, 45,07)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

A Tabela 4-44 apresenta a estatística de Fleiss' Kappa, na qual esse coeficiente não é significativo do ponto de vista da análise de concordância dos avaliadores, pois o seu $p - valor > 0,05$. Vale a pena ressaltar que a hipótese nula, de que o coeficiente de Fleiss' Kappa é significativo, foi fortemente rejeitada com o alto valor de $p - valor = 0,9631$.

Assim, como na seção anterior de análise de ocorrência, o indicador de concordância de Fleiss' Kappa só permite estatisticamente classificar o FMEA como: NÃO HÁ CONCORDÂNCIA das avaliações.

Tabela 4-44 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Detecção (*Between*)

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
1	-0,0714	0,0745	-0,9583	0,8310
2	-0,1057	0,0745	-1,4190	0,9221
3	-0,1057	0,0745	-1,4190	0,9221
4	-0,0763	0,0745	-1,0248	0,8473
5	0,0498	0,0745	0,6685	0,2519
6	-0,0576	0,0745	-0,7742	0,7805
7	-0,0465	0,0745	-0,6240	0,7337
8	-0,0289	0,0745	-0,3885	0,6512
9	-0,0227	0,0745	-0,3049	0,6198
Global	-0,0527	0,0294	-1,7876	0,9631

O coeficiente de concordância de Kendall, apresentado na Tabela 4-45, exibe o índice geral de concordância entre os avaliadores para a detecção dos modos de falha para os modos de falha com relação as suas detecções que é $Kendall = 0,1160$. Entretanto, esse índice não é significativo, pois $P - valor > 0,05$, bem como para o experimento temos $Chi - Qd_{Detecção} < Chi - Qd_{crítico}$.

Tabela 4-45 Coeficiente de Kendall para Detecção (*Between*)

Coeficiente	Chi-Qd _{Detecção}	DF	P
0,1160	4,1765	4	0,3826

Assim como no subitem anterior, todas as avaliações do índice de detecção na análise por GR&R atributo não são significativas. Portanto, considerando a Detecção, o índice de Kendall é classificado como INACEITÁVEL. Com esses resultados, pode-se dizer que o FMEA realizado com relação ao índice de Detecção está longe do aceitável para um sistema no qual os jurados devem concordar entre si.

Novamente, o FMEA Experimental está estatisticamente sob suspeita para o índice Detecção, com o coeficiente de *Kendall* = 0,1160 não significativo. Há grande disparidade de conceitos que foram adotados pelo engenheiro de processos, analista de qualidade e o engenheiro industrial durante o FMEA Experimental estudado.

4.4.3.4 RPN – Número de Prioridade de Risco

A abordagem quantitativa ao FMEA Experimental termina com a verificação do último índice, cujo é produto dos índices de Severidade, Ocorrência e Detecção: o RPN. Apesar dos resultados apresentados anteriormente não serem satisfatórios do ponto de vista do MAS, recomendado pela literatura e classificação proposta, verificar-se-á nesta seção, apesar das disparidades anteriores, se ao menos o produto dos modos de falha é estatisticamente aceitável.

Essa hipótese surgiu, sabendo-se que um dos pontos fracos e mais criticados por diversos autores sobre o FMEA é o grande número de combinações que resultam num mesmo número RPN (PUENTE et al., 2002; BRAGLIA et al., 2003b; YANG et al, 2008; CHANG e SUN, 2009; WANG et al., 2009b; CHIN et al. (2009a, 2009b); LIU et al. (2011, 2012); GARGAMA e CHATURVEDI, 2011; ZHANG e CHU, 2011; KUTLU e EKMEKÇIOG, 2012).

Assim, essas possibilidades de combinação podem compensar as diferentes opiniões encontradas até agora, o que ainda pode tornar o FMEA menos enviesado e estatisticamente aceitável.

4.4.3.4.1 Análise de Concordância entre observador (*Within*)

Assim como nas análises anteriores, o RPN também será considerado como uma medição, na qual avaliadores atribuem notas, apesar de ser um número calculado por meio do produto das notas de Severidade, Ocorrência e Detecção.

Então, de maneira análoga, tem-se os mesmos procedimentos de cálculo estatístico anteriores, para verificar se o RPN é o suficiente para classificar e priorizar os modos de falha que estão sob julgamento dos especialistas.

Inicialmente, tem-se na Figura 4-8 o *Run Chart* que exhibe o RPN resultante para o FMEA desenvolvido. Observa-se que a escala é maior, pois varia de 1 a 1000, que é o número de combinações dos índices *SxDxO*. Considerando essas informações, pode-se conferir que

durante os três processos de avaliação dos modos de falha, os RPN calculados tiveram grande variação para todos os especialistas. Os valores dos RPN gerados pelos três avaliadores são praticamente aleatório, se examinarmos a Figura 4-8 e Figura 4-9.

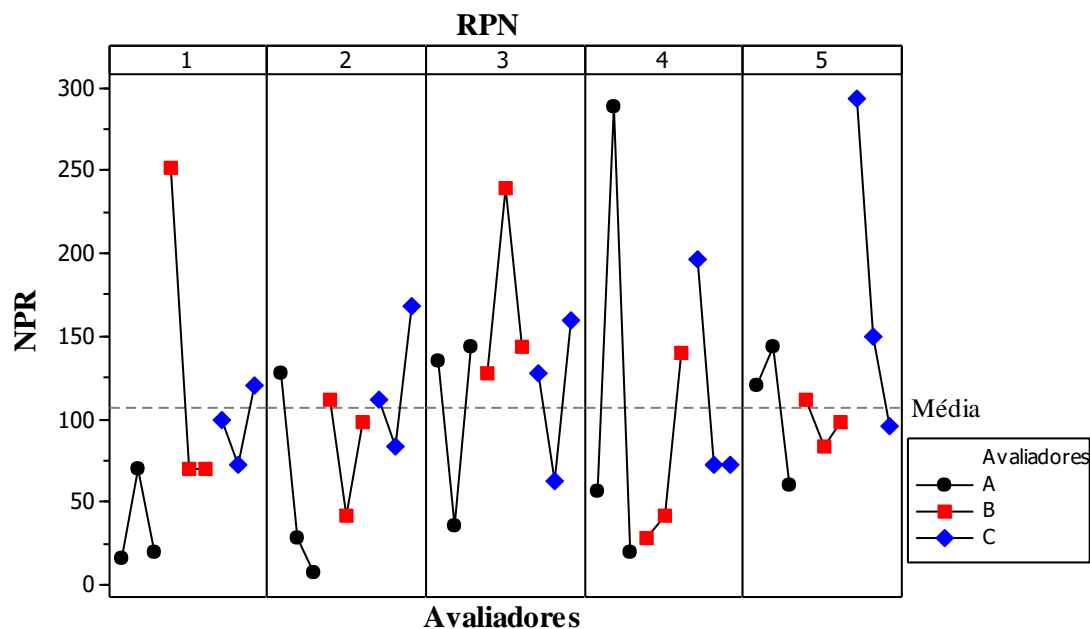


Figura 4-8 Gráfico do produto RPN

Ainda, observa-se que os avaliadores pouco concordam em termos do RPN, pois a disparidade dos resultados foi mais ampliada pelo produto. Os avaliadores A, B e C não combinaram nenhum dos RPNs nos três experimentos, como pode-se analisar o ICC na Tabela 4-46 a seguir:

Tabela 4-46 Análise de concordância para RPN (*Within*)

Avaliadores	#Inspeccionados	#Combinado	Porcentagem	IC 95%
A	5	0	0,00	(0,00, 45,07)
B	5	0	0,00	(0,00, 45,07)
C	5	0	0,00	(0,00, 45,07)

Combinado: avaliador concorda com ele mesmo em todos os ensaios

A mesma constatação é possível de ser realizada através do gráfico de concordância que inclui o intervalo de confiança do experimento, na Figura 4-9.

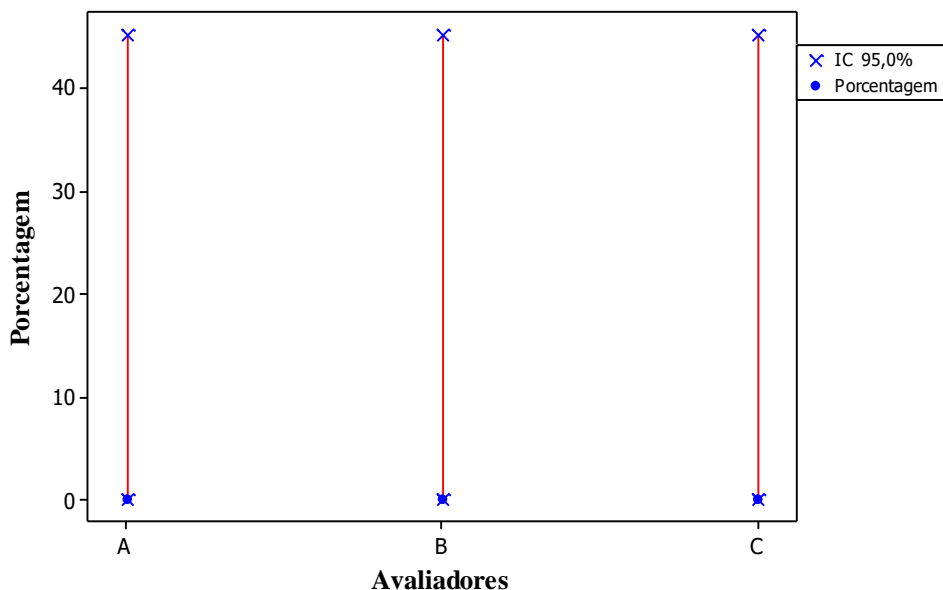


Figura 4-9 Nível de concordância entre avaliador para RPN (*Within*)

O cálculo do índice de Fleiss' Kappa não foi significativo para nenhum avaliador, pois $p - valor > 0,05$, ou seja, NÃO HÁ CONCORDÂNCIA (vide Tabela 4-47).

Tabela 4-47 Coeficiente de Fleiss' Kappa para RPN (*Within*)

Avaliador	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
A	-0.092233	0.077528	-1.18967	0.8829
B	-0.039604	0.086068	-0.46015	0.6773
C	-0.029412	0.080009	-0.36761	0.6434

Para a análise da concordância entre observador, o índice de Kendall calculado está apresentado na Tabela 4-48.

Tabela 4-48 Coeficiente de Kendall para RPN (*Within*)

Avaliador	Coeficiente	Chi - QdRPN	DF	P-valor
A	0,3220	3,8644	4	0,4247
B	0,4385	5,2631	4	0,2613
C	0,2542	3,0508	4	0,5494

Para a análise do RPN também tem-se $DF = 4$ e $\alpha = 0,05$, ou seja, o Chi - quadrado_{crítico} (X^2) = 9,4877. Comparando-se com os dados apresentados na Tabela 4-48 acima, observa-se que $Chi - Qd_{RPN} < Chi - Qd_{crítico}$ e $p - valor > 0,05$, ou seja, todas as avaliações realizadas por cada um dos três especialistas para o índice de prioridade de risco não são significativos.

Considerando-se os cálculos de concordância dos índices anteriores, podia-se prever que o RPN também não seria significativo para equipe, já que não concordaram sequer consigo mesmos, enquanto atribuíram as notas da Detecção e Ocorrência para os modos de falha.

Pode-se concluir que o RPN coloca estatisticamente o FMEA como INACEITÁVEL (vide Tabela 4-2) e esta falta de concordância dos avaliadores deve ser ponderada na análise dos modos e efeitos de falha que serão priorizados.

4.4.3.4.2 Análise de Concordância dentre os observadores (*Between*)

A seguir, tem-se a parte final da análise do FMEA Experimental. Por meio da Tabela 4-49, confere-se que através do ICC que não houve acordo geral dos avaliadores, os quais as suas opiniões não combinaram em nenhum dos modos de falha para os RPNs em termos percentuais.

Tabela 4-49 Análise de Concordância para RPN (*Between*)

Avaliações	# Combinadas	Porcentagem	95% IC
5	0	0,00	(0,00, 45,07)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

Na tabela anterior, observa-se que a porcentagem de combinações é de 0%, isto é, não houve RPN comum a nenhum dos avaliadores.

A estatística de Fleiss' Kappa, assim como ocorreu na análise anterior entre observador, foi calculada, mas não é significativa, uma vez que $p - valor > 0,05$ e, assim, a classificação é NÃO HÁ CONCORDÂNCIA.

Tabela 4-50 Coeficiente de Fleiss' Kappa para RPN (*Between*)

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
Global	-0.004257	0.0156535	-0.27195	0.6072

Por fim, analisou-se o coeficiente de concordância de Kendall, apresentado na Tabela 4-51 a seguir:

Tabela 4-51 Coeficiente de Kendall para RPN (*Between*)

Coeficiente	Chi - Qd RPN	DF	P-Valor
0,1568	5,6457	4	0,2272

Como na análise anterior, na Tabela 4-51 tem-se para o RPN que $\text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{crítico}} (X^2) = 9,4877$ e, como $\text{Chi} - Qd_{RPN} < \text{Chi} - Qd_{\text{crítico}}$ e $p - \text{valor} > 0,05$, as avaliações realizadas pelos especialistas não é significativa para o coeficiente de concordância de Kendall entre observadores e o mesmo classifica o FMEA como INACEITÁVEL.

Como destacou-se ao longo de toda a análise do FMEA Experimental, os especialistas não concordaram entre si no processo de atribuição das notas e o resultado final do FMEA não tem anuência de opiniões. Com o último cálculo para o índice de Kendall conclui-se que o FMEA realizado não é seguro do ponto de vista estatístico devido à falta de concordância entre os observadores.

4.4.4 Conclusões sobre o FMEA Experimental

Os resultados obtidos da abordagem quantitativa ao FMEA Experimental permitem obter-se informações sobre a confiabilidade desta ferramenta durante o processo de atribuição de suas notas.

Da avaliação dos avaliadores consigo mesmos, pode-se conferir que para a Severidade dos modos de falha, o Analista de Qualidade não alcançou o nível de concordância aceitável e seu desempenho foi classificado como NÃO HÁ CONCORDÂNCIA das avaliações com relação ao coeficiente de Fleiss' Kappa e seu FMEA como INACEITÁVEL para o índice de Kendall. Para o Engenheiro de Processos e o Engenheiro Industrial, os seus desempenhos foram classificados como MODERADO e como NÃO HÁ CONCORDÂNCIA das avaliações para o coeficiente de Fleiss' Kappa e os seus FMEA's são classificados como EXCELENTE e BOM, respectivamente, para a análise através do índice de Kendall.

A análise de Repetitividade para a Ocorrência, Detecção e RPN não foram satisfatórias. Para todos os especialistas e em todas as avaliações consigo mesmo a concordância segundo o coeficiente de Fleiss' Kappa é classificada como sem concordância das avaliações e o FMEA como INACEITÁVEL para a análise via índice de Kendall. Esses resultados permitem concluir que os avaliadores não concordaram consigo mesmos, bem como comprometem o FMEA e revelam que existe subjetividade no processo de atribuição das notas do FMEA, conforme o estudo de Repetitividade.

Na análise de concordância do time de avaliadores tomada em conjunto (*Between*), para Severidade, o coeficiente de Fleiss' Kappa o classifica como LEVE e para o coeficiente de Kendall como BOM. Para a Ocorrência, Detecção e RPN, não houve concordância a partir da análise das estatísticas de Fleiss' Kappa e Kendall, que o classificam como NÃO HÁ CONCORDÂNCIA das avaliações, INACEITÁVEL e NÃO HÁ CONCORDÂNCIA das avaliações, respectivamente. Tanto em relação ao índice de Fleiss' Kappa, quanto de Kendall, as classificações apontam que dentre os especialistas houve divergências de opinião durante as avaliações.

De um modo geral, a avaliação estatística de Reprodutividade e Repetitividade do FMEA permite concluir que os especialistas atribuíram as notas ao FMEA de maneira aleatória, comprovado pelos índices de concordância de ICC, Fleiss' Kappa e Kendall apresentado nesta seção. Isto quer dizer que o FMEA Experimental estudado estatisticamente deve ser fortemente rejeitado, ou seja, a partir do resultado do FMEA observamos que não há consistência das avaliações.

Além do mais, o FMEA desenvolvido não era complexo, com vários modos de falha e que pudesse colocar os especialistas em dúvida e questionamentos que levassem a confundi-los de maneira demasiada, pois o experimento continha apenas cinco modos de falha que foram analisados três vezes para garantir o estudo de MSA por atributos. Mesmo assim, os especialistas não convergiram as suas opiniões sobre os modos de falha para a Ocorrência, Detecção e RPN. Isso permite concluir que o FMEA no geral é subjetivo, principalmente após examinar a habilidade dos especialistas quanto a sua Reprodutividade e Repetitividade.

Portanto, pode-se fazer uma extensão dos problemas levantados nesse trabalho a outros FMEA's e destacar seu viés. Destaca-se das conclusões deste estudo, que o FMEA pode conter opiniões subjetivas dos especialistas que não concordam com sua própria opinião ou não as mantêm, conforme analisado pelo estudo, o que minimiza a fidedignidade dos resultados para tomada de decisão.

4.5 CASO 4 - Análise estatística do FMEA Fuzzy

Para realizar a abordagem quantitativa junto ao FMEA Fuzzy através de GR&R utilizou-se nesta Tese o caso e a base de dados apresentada na obra de Chanamool e Naenna (2016). Os

autores elaboraram um sistemático FMEA Fuzzy para melhorar o processo de priorização de riscos de um departamento de emergência na Ásia e o FMEA auxiliou à tomada de decisão, por ser uma metodologia relevante e pragmática.

As avaliações não tiveram repetição para que fosse possível analisar a habilidade de Repetitividade (*Within*), isto é, somente Reprodutividade.

Apresenta-se a abordagem quantitativa do FMEA Fuzzy nos próximos capítulos, assim como os comentários, discussões realizadas e na última parte os resultados dessas análises quanto a sua confiabilidade.

4.5.1 Base de dados do FMEA Fuzzy

No trabalho de Chanamool e Naenna (2016) cinco especialistas selecionaram e atribuíram pontuações individuais para priorizar os riscos de um departamento de emergência. Essas pontuações foram obtidas com base na sensibilidade, experiência e técnica dos membros do time selecionados, que avaliaram os três fatores S, O e D, similarmente ao método tradicional de FMEA, porém, utilizando-se a padronização estabelecida e a metodologia da lógica Fuzzy, conforme a Figura 4-10.



Figura 4-10 Etapas de análise do sistema Fuzzy – FMEA

A pontuação total, atribuída por cada especialista, foi *defuzificada* por meio de programação das regras de lógica Fuzzy no MATLAB. Os autores utilizaram 125 regras, das quais temos uma amostra na Figura 4-11 codificadas no MATLAB, por meio da conjunção “*and*” para vincular cada fator ao valor de saída e, assim, executar a inferência na validação das notas atribuídas.

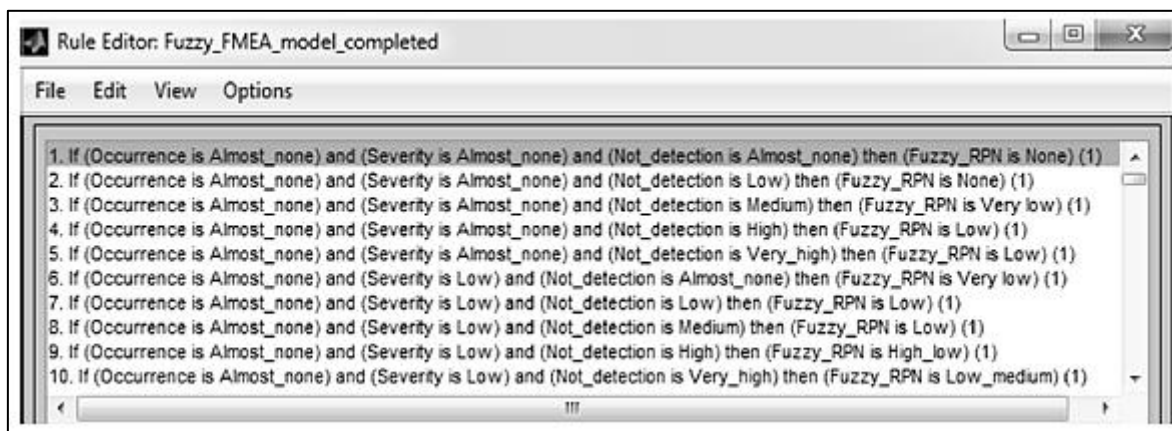


Figura 4-11 Regras de defuzzificação do FMEA Fuzzy no MATLAB

Dessa maneira, o modelo programado por meio de lógica FMEA Fuzzy, afinal, calcula e gera os dados disponíveis na pesquisa de Chanamool e Naenna (2016), utilizados como fonte nesta seção da Tese, apresentados na Tabela 4-53.

Ressalta-se o uso somente das informações relacionadas à análise do FMEA Fuzzy do trabalho original de Chanamool e Naenna (2016). Outras eventuais informações e inferências da pesquisa podem ser conferidas diretamente no artigo original e não fazem parte do objetivo dessa Tese.

Tabela 4-52 Tabela de classificação FMEA Fuzzy defuzificada

Failure	SEVERIDADE						OCORRÊNCIA						DETECÇÃO						FRPN					PRIORIZAÇÃO
	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	Mean (S)	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	Mean (O)	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	Mean (D)	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	Ordem
1	3	8	1	1	8	2,86	3	5	2	2	5	3,13	1	9	6	2	9	3,96	9	360	12	4	360	8
2	3	8	6	1	9	4,19	2	9	7	2	9	4,69	1	9	8	2	10	4,28	6	648	336	4	810	1
3	2	6	6	2	5	3,73	3	8	6	3	8	5,1	2	2	8	3	2	2,86	12	96	288	18	80	5
4	2	3	5	2	3	2,83	2	4	6	4	5	3,95	2	1	5	4	2	2,4	8	12	150	32	30	12
5	2	3	5	2	3	2,83	3	5	9	4	7	5,19	2	1	5	4	2	2,4	12	15	225	32	42	11
6	2	2	8	5	2	3,17	2	3	8	7	2	3,68	2	1	6	5	1	2,27	8	6	384	175	4	10
7	2	2	8	5	2	3,17	2	5	8	5	6	4,74	2	1	6	5	1	2,27	8	10	384	125	12	7
8	1	2	5	3	1	1,97	2	2	6	5	2	2,99	1	1	3	5	1	1,72	2	4	90	75	2	15
9	4	6	8	3	6	5,1	1	10	10	5	10	5,49	1	1	3	3	1	1,55	4	60	240	45	60	3
10	3	1	7	3	1	2,29	1	2	6	4	3	2,7	2	1	4	3	1	1,89	6	2	168	36	3	14
11	2	6	8	5	4	4,54	1	3	6	3	3	2,77	2	1	4	3	1	1,89	4	18	192	45	12	6
12	2	5	6	6	5	4,48	1	6	9	5	6	4,38	2	1	7	3	2	2,43	4	30	378	90	60	2
13	1	6	6	6	6	4,19	2	8	7	5	8	5,37	3	1	7	3	1	2,29	6	48	294	90	48	2
14	3	1	6	6	2	2,93	1	3	6	5	3	3,06	1	10	7	10	10	5,88	3	30	252	300	60	9
15	1	1	1	2	1	1,15	1	1	6	6	1	2,05	1	10	1	10	10	3,98	1	10	6	120	10	17
16	3	8	1	2	8	3,29	2	8	9	3	8	5,1	1	10	5	10	10	5,49	6	640	45	60	640	4
17	3	1	1	3	1	1,55	4	7	9	9	7	6,92	4	1	5	5	1	2,51	48	7	45	135	7	16
18	4	3	2	3	3	2,93	4	7	7	5	9	6,15	5	2	5	4	1	2,89	80	42	70	60	27	13
19	4	5	1	2	5	2,89	4	7	7	6	7	6,07	1	10	6	10	10	5,7	16	350	42	120	350	6
20	5	6	6	6	5	5,58	6	6	6	6	6	6	6	6	5	5	6	5,58	180	216	180	180	180	1
21	6	6	5	6	6	5,79	6	6	6	6	6	6	5	5	6	5	5	5,19	180	180	180	180	180	1

Fonte: adaptado de Chanamool e Naenna (2016)

4.5.2 Análise dos Resultados: FMEA Fuzzy

Analisou-se as três variáveis resposta do FMEA como sistema de medição, tomando-se cada índice de pontuação do FMEA como uma métrica variável por atributo discreta, na respectiva ordem:

- Severidade
- Ocorrência
- Detecção
- FRPN (Fuzzy Risk Priority Number)

Para cada um dos índices acima o FMEA Fuzzy terá a análise *GR&R* de Reprodutividade para avaliar a análise de concordância dentre os observadores (*Between*).

4.5.2.1 Severidade

Primeiramente, realizou-se a análise através do coeficiente ICC apresentado na Tabela 4-53. O número de avaliações combinadas pelos cinco especialistas, isto é, o número de avaliações cuja opinião foi a mesma para todos os avaliadores para o mesmo modo de falha, de um total de 21, em nenhuma os cinco especialistas atribuíram exatamente o mesmo conceito, o que representa 0,0% das tentativas.

Tabela 4-53 Análise de Concordância para Severidade

Avaliações	# Combinadas	Porcentagem	95% IC
21	0	0,0%	(0,00 ; 13,29)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

A Tabela 4-54 apresenta a análise dos especialistas através do coeficiente de Fleiss' Kappa. Para o experimento $p - valor < 0,05$, então o índice de Fleiss é significativo. A partir disso, o índice de global é Fleiss' Kappa = 0,1057 o que classifica o FMEA quanto a análise de Severidade como LEVE.

A análise do coeficiente de concordância de Kendall é exibida na Tabela 4-55 da qual pode-se extrair os dados de $DF = 17$ e $\alpha = 0,05$. Assim, tem-se $Chi - quadrado_{crítico} (X^2) = 27,5871$ e comparando-se com o experimento tem-se $Chi - quadrado_{Severidade} > Chi - quadrado_{crítico}$ e $p - valor < 0,05$, ou seja, os seis especialistas concordam a respeito do índice Severidade atribuídos aos modos de falha.

Tabela 4-54 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Severidade

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
1	0,1954	0,0690	2,8316	0,0023
2	0,0426	0,0690	0,6180	0,2683
3	0,0524	0,0690	0,7604	0,2235
4	-0,0396	0,0690	-0,5739	0,7170
5	-0,0302	0,0690	-0,4379	0,6693
6	0,3154	0,0690	4,5716	0,0000
7	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
8	0,0277	0,0690	0,4025	0,3436
9	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
Global	0,1057	0,0294	3,5858	0,0002

O índice de *Kendall* = 0,3270 aponta que a concordância do FMEA para análise da Severidade é de ATENÇÃO – REVISÃO, segundo a Tabela 4-2. Essa análise estatística apresenta que a concordância entre os avaliadores deve ser revista, ou seja, em termos da Severidade há pouco consenso, o que poderia inclusive ser recusado e/ou deveria ser realizado novamente.

Tabela 4-55 Coeficiente de Kendall para Severidade

Coeficiente de Kendall	Chi - Qd	DF	P
0,3270	32,7016	20	0,0364

4.5.2.2 Ocorrência

Sobre a avaliação da Ocorrência dos modos de falha, percebe-se o ICC através da Tabela 4-56, em que apenas 2 combinações das avaliações de um total de 21 modos de falha foram obtidas, ou seja, 9,52%.

Tabela 4-56 Análise de Concordância para Ocorrência

Avaliações	# Combinadas	Porcentagem	95% IC
21	2	9,52%	(1,17; 30,38)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

Da Tabela 4-57 tem-se o índice de Fleiss' Kappa significativo, pois $p - valor < 0,05$. Para o FMEA, tem-se Fleiss' Kappa global = 0,1436, o que permite classificá-lo com concordância LEVE (vide Tabela 4-1). Isto quer dizer que os avaliadores tiveram dificuldade durante o processo de classificação da Ocorrência.

Tabela 4-57 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Ocorrência

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
1	0,1204	0,0690	1,7460	0,0404
2	0,0934	0,06900	1,3535	0,0879
3	0,1061	0,06900	1,5387	0,0619
4	0,0051	0,06900	0,0739	0,4705
5	-0,0349	0,06900	-0,5064	0,6937
6	0,3674	0,06900	5,3251	0,0000
7	0,1368	0,06900	1,9831	0,0237
8	0,1204	0,06900	1,7460	0,0404
9	0,0528	0,06900	0,7656	0,2219
10	0,4852	0,06900	7,0325	0,0000
Global	0,1436	0,02502	5,7388	0,0000

A investigação do coeficiente de Kendall apresenta $\text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{crítico}} (X^2) = 27,5871$, e comparando-se com o cálculo experimental, tem-se $\text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{Ocorrência}} > \text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{crítico}}$ e $p - \text{valor} < 0,05$. Então, o índice é significativo e os especialistas concordam entre si, conforme Tabela 4-58.

Tabela 4-58 Coeficiente de Kendall para Ocorrência

Coeficiente de Kendall	Chi - Qd	DF	P
0,4216	42,1695	20	0,0026

Analisando-se o quanto concordam os especialistas, tem-se Kendall = 0,4216, segundo a Tabela 4-2, a classificação do FMEA é CONSIDERÁVEL para a concordância.

4.5.2.3 Detecção

Para a Detecção dos modos de falha não houve número de combinações dos 21 modos de falha avaliados, segundo o coeficiente de ICC na Tabela 4-59, o que corresponde a 0% de combinações das opiniões dos especialistas.

Tabela 4-59 Análise de Concordância para a Detecção

Avaliações	# Combinadas	Porcentagem	95% IC
21	0	0,00	(0,00; 13,29)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

A análise de Detecção dos modos de falha, de acordo com o cálculo da estatística de Fleiss' Kappa, foi significativa, pois $p - \text{valor} < 0,05$, como pode-se ver na Tabela 4-60. Ainda segundo a Tabela 4-60, tem-se $\text{Fleiss' Kappa} = 0,0741$, que segundo a Tabela 4-1, a concordância é classificada como LEVE.

Tabela 4-60 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Detecção

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
1	-0,0719	0,0690	-1,0421	0,8513
2	0,0414	0,0690	0,6004	0,2741
3	0,0277	0,0690	0,4025	0,3436
4	-0,0606	0,0690	-0,8782	0,8101
5	0,1520	0,0690	2,2032	0,0138
6	0,1204	0,0690	1,7460	0,0404
7	-0,0294	0,0690	-0,4262	0,6650
8	-0,0194	0,0690	-0,2813	0,6108
9	0,1421	0,0690	2,0600	0,0197
10	0,3854	0,0690	5,5857	0,0000
Global	0,0741	0,0281	2,6376	0,0042

Para o cálculo do coeficiente de Kendall, na Tabela 4-61 tem-se o valor do Chi – quadrado_{Detecção} = 28,0120, e comparando-se com o valor de referência, Chi – quadrado_{Ocorrência} > Chi – quadrado_{crítico}, mas $p - valor > 0,05$. Então, o índice não é significativo e os especialistas concordam entre si.

Tabela 4-61 Coeficiente de Kendall para a Detecção

Coeficiente de Kendall	Chi - Qd	DF	P
0,2801	28,0120	20	0,1091

Esse resultado para o índice de Kendall considera o FMEA estudado, de acordo com a Tabela 4-2, em relação a Detecção como INACEITÁVEL.

4.5.2.4 FRPN

O FRPN (Fuzzy RPN) extraído do trabalho de Chanamool e Naenna (2016), cujo é a multiplicação Fuzzy dos elementos analisados no FMEA, também foi abordado em termos da concordância. Como exhibe a Tabela 4-62, o ICC para os 21 produtos (*SxOxD*) de todos os modos de falha gerados pela avaliação dos índices de risco pelos seis especialistas, apenas em uma o RPN foi igual.

Tabela 4-62 Análise de Concordância para o RPN

Avaliações	# Combinadas	Porcentagem	95% IC
21	1	4,76%	(0,12; 23,82)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

O índice de Fleiss' Kappa calculado tem $p - valor < 0,05$ e, portanto, é significativo como pode-se conferir na Tabela 4-63. Com Fleiss' Kappa = 0,0824, o FRPN do FMEA realizado no estudo de Chanamool e Naenna (2016) é classificado como concordância LEVE.

Tabela 4-63 Coeficiente de Fleiss' Kappa para o RPN

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
1	-0,0096	0,06900	-0,1393	0,5554
2	0,1421	0,06900	2,0600	0,0197
3	-0,0194	0,06900	-0,2814	0,6108
4	-0,0714	0,06900	-1,0351	0,8497
6	-0,0606	0,06900	-0,8783	0,8101
7	0,2354	0,06900	3,4118	0,0003
8	-0,0294	0,06900	-0,4262	0,6650
9	-0,0096	0,06900	-0,1393	0,5554
10	0,1421	0,06900	2,0600	0,0197
12	-0,0606	0,06900	-0,8783	0,8101
15	-0,0096	0,06900	-0,1393	0,5554
16	-0,0096	0,06900	-0,1393	0,5554
18	-0,0194	0,06900	-0,2814	0,6108
48	0,1421	0,06900	2,0600	0,0197
60	0,0277	0,06900	0,4025	0,3436
70	-0,0096	0,06900	-0,1393	0,5554
75	-0,0096	0,06900	-0,1393	0,5554
80	-0,0194	0,06900	-0,2814	0,6108
90	-0,0294	0,06900	-0,4262	0,6650
96	-0,0096	0,06900	-0,1393	0,5554
120	-0,0194	0,06900	-0,2814	0,6108
125	-0,0096	0,06900	-0,1393	0,5554
135	-0,0096	0,06900	-0,1393	0,5554
150	-0,0096	0,06900	-0,1393	0,5554
168	-0,0096	0,06900	-0,1393	0,5554
175	-0,0096	0,06900	-0,1393	0,5554
240	-0,0096	0,06900	-0,1393	0,5554
252	-0,0096	0,06900	-0,1393	0,5554
288	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
294	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
300	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
336	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
378	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
384	-0,0194	0,0690	-0,2814	0,6108
640	0,2354	0,0690	3,4118	0,0003
648	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
810	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
Global	0,0824	0,0128	6,4086	0,0000

Analisando-se a Tabela 4-64 a seguir, sobre a investigação do coeficiente de Kendall, tem-se que $\text{Chi - quadrado}_{\text{crítico}} (X^2) = 27,5871$ e $\text{Chi - quadrado}_{\text{Fuzzy-FMEA}} =$

28,8697, ou seja, tem-se $\text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{crítico}} < \text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{RPN}}$, mas como $\text{p-valor} > 0,05$, considera-se o coeficiente de concordância de Kendall como não significativo.

Assim, conforme expõe-se na Tabela 4-2, com o coeficiente de concordância de Kendall calculado não significativo, aponta-se que o FMEA é classificado como INACEITÁVEL no quesito FRPN.

Tabela 4-64 Coeficiente de Kendall para o RPN

Coeficiente de Kendall	Chi - Qd	DF	P
0,2887	28,8697	20	0,0904

Deste modo, existe evidência que o FRPN apresenta viés de concordância para a tomada de decisão a partir deste tipo de FMEA.

4.5.2.5 Conclusões do FMEA Fuzzy

A abordagem quantitativa através da análise estatística dos índices ICC, Fleiss' Kappa e Kendall aplicada ao FMEA Fuzzy utilizou as referências e os dados do trabalho publicado por Chanamool e Naenna (2016).

Observando-se o índice de concordância de Fleiss' Kappa, tem-se que a classificação das avaliações da Severidade, Ocorrência e Detecção, bem como o FRPN é classificada como LEVE. A análise por Kendall, aponta que FMEA Fuzzy é classificado como CONSIDERÁVEL para a Ocorrência e ATENÇÃO – REVISÃO para as variáveis de Severidade e Detecção, contudo, INACEITÁVEL para o FRPN.

Compreendendo-se as análises do FRPN como o resultado final do FMEA Fuzzy, pois é a grandeza considerada para a priorização dos índices de risco, pode-se dizer que esta metodologia não apresenta concordância estatística. Sugere-se que o FMEA Fuzzy possui resultado comprometido em relação a sua confiabilidade para tomada de decisão.

Portanto, as avaliações devem ser reconsideradas pelos avaliadores do caso FMEA Fuzzy, uma vez que se mostraram subjetivas sobre a priorização dos modos de falha do caso publicado.

4.6 Conclusões sobre a abordagem quantitativa ao FMEA

Baseando-se nos resultados dos casos abordados quantitativamente neste Capítulo, pode-se aferir, com propriedade, sobre a confiabilidade do FMEA como ferramenta para tomada de decisões.

Na tabela a seguir, tem-se o resultado consolidado de cada um dos casos avaliados:

Tabela 4-65 Abordagem quantitativa - Consolidado

CASO FMEA	Tipo de FMEA	R&R	ÍNDICE DE RISCO	CONFIABILIDADE			
				ICC	Kappa	Kendall	
CASO 1	FMEA Tradicional	Reprodutividade	SEVERIDADE	5,56%	CONSIDERÁVEL	BOM	
			OCORRÊNCIA	11,11%	LEVE	CONSIDERÁVEL	
			DETECÇÃO	50,00%	NÃO HÁ CONCORDÂNCIA	INACEITÁVEL	
			RPN	0,00%	LEVE	CONSIDERÁVEL	
CASO 2	FMEA FMAGDM	Reprodutividade	RPN	5,56%	LEVE	ATENÇÃO – REVISÃO	
CASO 3	FMEA EXPERIMENTAL	Repetitividade	SEVERIDADE	Avaliador A	20,00%	NÃO HÁ CONCORDÂNCIA	INACEITÁVEL
				Avaliador B	80,00%	NÃO HÁ CONCORDÂNCIA	EXCELENTE
				Avaliador C	20,00%	MODERADO	BOM
			OCORRÊNCIA	Avaliador A	20,00%	NÃO HÁ CONCORDÂNCIA	INACEITÁVEL
				Avaliador B	20,00%	NÃO HÁ CONCORDÂNCIA	INACEITÁVEL
				Avaliador C	0,00%	NÃO HÁ CONCORDÂNCIA	INACEITÁVEL
			DETECÇÃO	Avaliador A	0,00%	NÃO HÁ CONCORDÂNCIA	INACEITÁVEL
				Avaliador B	0,00%	NÃO HÁ CONCORDÂNCIA	INACEITÁVEL
				Avaliador C	0,00%	NÃO HÁ CONCORDÂNCIA	INACEITÁVEL
			RPN	Avaliador A	0,00%	NÃO HÁ CONCORDÂNCIA	INACEITÁVEL
				Avaliador B	0,00%	NÃO HÁ CONCORDÂNCIA	INACEITÁVEL
				Avaliador C	0,00%	NÃO HÁ CONCORDÂNCIA	INACEITÁVEL
CASO 4	FMEA Fuzzy	Reprodutividade	SEVERIDADE	0,00%	LEVE	ATENÇÃO – REVISÃO	
			OCORRÊNCIA	9,52%	LEVE	CONSIDERÁVEL	
			DETECÇÃO	0,00%	LEVE	INACEITÁVEL	
			FRPN	4,76%	LEVE	INACEITÁVEL	

Nesta abordagem, verificou-se que não existe diferença significativa do resultado entre os tipos de FMEA e/ou sua aplicabilidade, se comparados com o FMEA Tradicional. Este fato, mostra que, apesar do objetivo de aliar ferramentas ao FMEA, os resultados em termos de concordância das avaliações dos modos de falha e índices de risco não são eficientes ou contribuíram significativamente para eliminar a subjetividade do FMEA. Sobretudo, levando-se em consideração a complexidade de aliar diferentes ferramentas ao FMEA, como as técnicas mais empregadas como Lógica Fuzzy e análise Multi-critério, não existe retorno para o esforço,

principalmente, considerando-se o lado prático esta ferramenta possui para aplicações na indústria no auxílio à tomada de decisão.

De maneira geral, pode-se afirmar que a introdução de conceitos de R&R, chamada de abordagem quantitativa, permite estudar o FMEA e avaliar a sua confiabilidade. Nesta Tese, fundamentado na análise de vários tipos de FMEA apresentados neste Capítulo 4, tem-se que os resultados dos FMEA são subjetivos e questionáveis. Ademais, observa-se que não há confiabilidade das avaliações do FMEA para tomada de decisões.

Portanto, considerando-se os pontos críticos capturados nesta presente seção e a análise dos resultados sobre o FMEA, no próximo Capítulo, apresenta-se uma proposta de metodologia FMEA R&R para minimizar a subjetividade desta ferramenta e aumentar a sua confiabilidade.

5 PROPOSTA DE FMEA R&R

Baseando-se na observação de pontos críticos do FMEA levantados na literatura apresentados no Capítulo 2 e a partir da análise dos experimentos anteriores no Capítulo 4, neste Capítulo é proposto um novo modelo de FMEA, com base em observação de melhorias e na análise R&R.

5.1 Proposta de FMEA R&R

Este novo modelo, é nomeado, nesta Tese, como “FMEA R&R”. Esta proposta tem como objetivo construir uma metodologia que minimize a subjetividade do FMEA, através de diretrizes e etapas claramente definidas, com o precedente de eliminar traços de incerteza do processo de avaliação dos índices de risco S, O, D e RPN.

Para desenvolver este modelo, nesta fase da pesquisa, efetuou-se uma análise crítica para identificar e estabelecer quais são os problemas dessa ferramenta que afetam ou estejam correlacionados com a sua subjetividade e, por conseguinte, impactam na confiabilidade dos seus resultados. Então, pode-se observar, com base no que foi discutido nos Capítulos 2 e 4, que a subjetividade dos resultados do FMEA ocorrem devido a fatores relevantes presentes nas primeiras etapas, iniciando-se pela deficiência de gestão na aplicação da ferramenta, estendendo-se pelas etapas de definição dos modos de falha e os riscos, bem como no estabelecimento dos critérios para avaliação dos índices de risco e no nível de comprometimento do time envolvido, uma vez que não há nenhuma análise qualitativa posterior às notas atribuídas.

Tendo em vista todas estas fontes de subjetividade, consolidou-se o que é relevante e importante para minimizá-la e, apresenta-se a seguir, cada um destes fatores e o seu impacto no FMEA:

- Gestão do FMEA: a subjetividade presente no FMEA é resultado de toda a condução de avaliação de riscos potenciais na aplicação desta ferramenta, por isso, a presença de um gestor, responsável pela condução das avaliações é fundamental. Entretanto, atualmente, apesar de muitas empresas ou centros de pesquisa contarem com um responsável por sua análise ou até mesmo uma área específica, destaca-se, nesta pesquisa, que este tem importância além das

responsabilidades de gestão de escopo e os objetivos do FMEA. Este líder deve possuir perfil analítico, a fim de criteriosamente entender e criticar os seus resultados, avaliando-se a qualidade de cada das notas atribuídas aos índices de risco S, O e D, a fim de questionar a subjetividade presente na ferramenta;

- Escala de Severidade, Ocorrência e Detecção: para classificar o risco de cada modo de falha, deve-se, fundamentalmente, estabelecer uma escala com base em algum fator mensurável, isto é, referências como o impacto financeiro, quantidade de produto, horas envolvidas ou taxa de manutenção. Isto posto, toda a equipe de avaliadores deve utilizar estas referências como base e critério, a fim de equalizar a interpretação e, assim, atribuir as notas a cada um dos índices S, O e D.
- Definição dos modos de falha: a definição em grupo dos modos de falha, por meio do *Brainstorm* estimula a participação e compartilhamento do conhecimento dos envolvidos com o FMEA, de forma a capacitar uma discussão aberta. O principal objetivo deve ser definir de maneira clara estes modos, porém, deve-se aproveitar o ensejo para alinhar e preparar os especialistas para a avaliação do FMEA, de forma que todas as causas e efeitos sejam de conhecimento da equipe;
- Equipe: as equipes devem ser diversificadas e com conhecimento no objeto de análise do FMEA. Isto, garante que as opiniões sejam técnicas e o processo de atribuição de notas aos índices de prioridade de risco não se tornem aleatórios, ao contrário do que se espera.
- Tipo de FMEA: Conforme pode-se concluir no Capítulo 4.6, não existe melhorias significativas na confiabilidade nos tipos de FMEA Fuzzy ou Multi-critério. O método FMEA Tradicional, se comparado aos outros métodos avaliados nesta Tese, apresentou resultados de confiabilidade semelhante e não justificam o uso de outras ferramentas, pelo contrário, isso pode onerar a sua aplicabilidade. Assim, recomenda-se nesta obra, o uso do tipo de FMEA Tradicional.

Além destes pontos, no modelo FMEA R&R, introduz-se os conceitos de R&R para avaliar a habilidade de Reprodutividade da equipe. Entende-se que o R&R desperta o interesse e motiva os avaliadores, uma vez sabendo-se que a sua habilidade de atribuir a nota também será avaliada. Esta razão fomenta o comprometimento e evidencia a responsabilidade do especialista durante o processo de avaliação do FMEA para torná-lo menos tendencioso.

A partir de toda esta análise crítica sobre a subjetividade do FMEA, destacando-se cada um dos fatores identificados como mais relevantes e que impactam na confiabilidade dos seus resultados para a tomada de decisão, propõe-se um modelo de FMEA que minimize sua subjetividade, com foco nos pontos destacados no presente Capítulo.

5.2 Modelagem do FMEA R&R

Nesta seção da Tese, propõe-se uma nova modelagem para o FMEA, baseando-se na análise discutida no Capítulo anterior. O cerne desta proposta é construir uma metodologia que minimize a subjetividade do FMEA, por meio de diretrizes e etapas de desenvolvimento alinhadas com este conceito, a fim de diminuir ou eliminar o grau de parcialidade, tendência e viés do processo de avaliação dos índices de risco S, O, D e RPN.

Este novo modelo, nomeado como “FMEA R&R”, foi desenvolvido com base no tipo de FMEA Tradicional aliado aos conceitos da Análise do sistema de Medição R&R atributos, conforme abordagem quantitativa discorrida no Capítulo 4 desta Tese. Na Figura 5-1, pode-se observar o FMEA R&R proposto, com a sua estrutura do roteiro de execução do FMEA, com a descrição de cada uma das etapas da metodologia, em ordem crescente, de maneira intuitiva e lógica, etapa-a-etapa como um *Roadmap*.

No FMEA R&R, é responsabilidade do Líder a gestão de toda a condução da sua aplicação e, pode ser parte integrante do time que avalia o FMEA R&R. Neste modelo proposto, o Líder FMEA R&R deve realizar a gestão do escopo e os objetivos do FMEA, bem como observar e questionar possíveis desvios que possam ocasionar em algum viés.

Na etapa 1, conforme Figura 5-1, o Líder deve realizar o planejamento do desenvolvimento do FMEA R&R, definindo-se a equipe multifuncional. Como pré-requisito, as equipes devem ter entre três e no máximo cinco participantes, uma vez que a quantidade maior de avaliadores pode gerar mais incerteza nas avaliações. Além disso, a equipe deve conhecer

detalhadamente o objeto de análise, se possível, trabalhar com o maior número de especialistas técnicos, para garantir a diversidade do time.

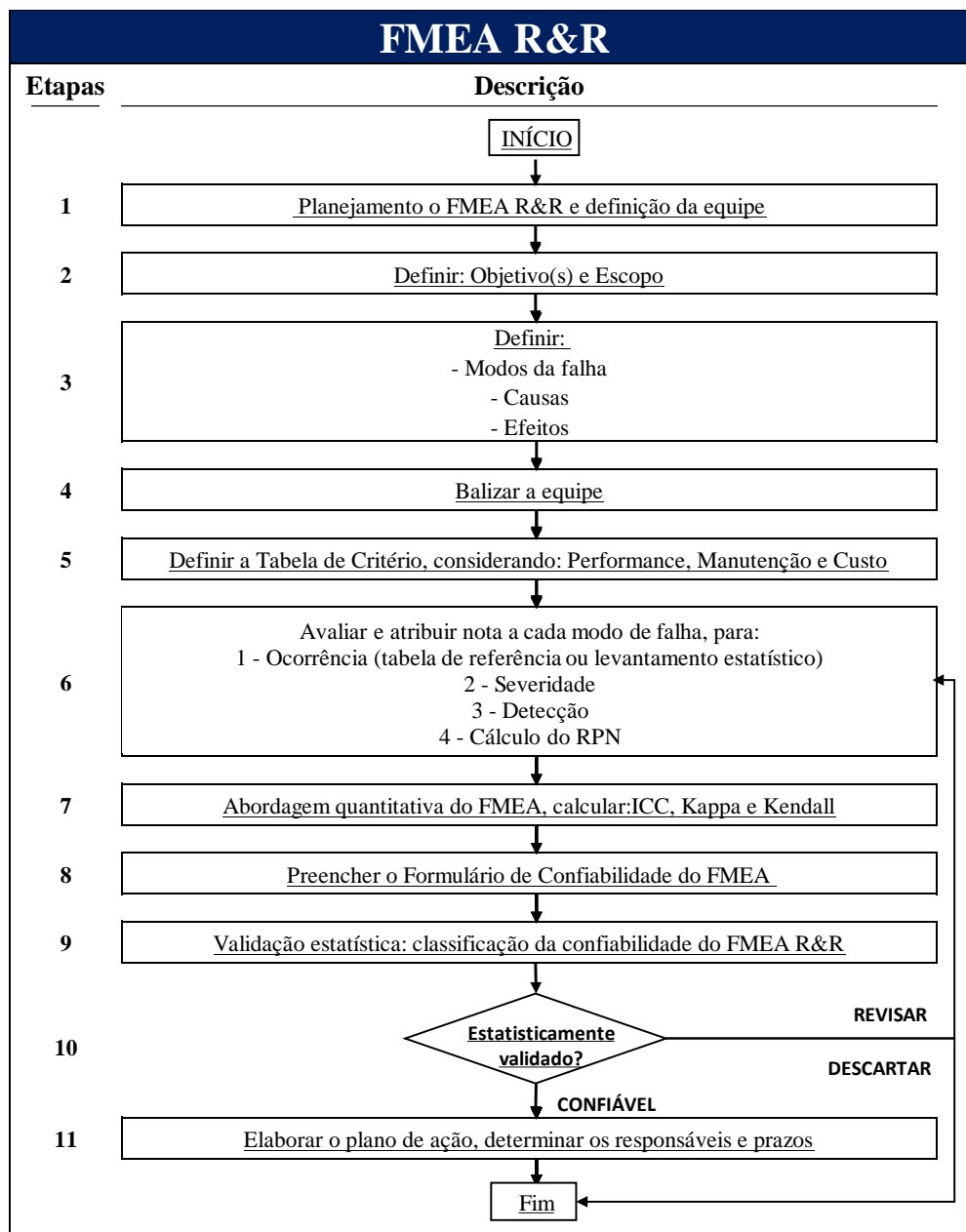


Figura 5-1 Roadmap do FMEA R&R

Na etapa 2, a equipe selecionada deve definir qual é ou são os objetivos do FMEA, bem como delimitar o escopo do sistema sob análise. Esta atividade é fundamental para determinar o que deverá ser considerado como riscos ou efeitos avaliados.

Na sequência, tem-se a etapa 3 do FMEA R&R, na qual define-se, os modos de falha. Esta atividade deve ser realizada em conjunto com todos os integrantes selecionados, por meio de *Brainstorm*, para que o conhecimento sobre o sistema em análise seja extraído de cada um dos integrantes da equipe formada. É importante ressaltar que esta etapa é fundamental no FMEA R&R para minimizar a subjetividade desta ferramenta, na qual cada um dos modos de falha escolhidos seja da ciência de toda equipe. Deste modo, é possível garantir que o nível de compreensão entre os especialistas, para avaliar os índices de risco do FMEA, tenha sido nivelado. Assim, os modos selecionados são listados e inseridos no Formulário de avaliação - FMEA R&R, expostos na Figura 5-2. Por fim, para cada um destes modos de falha, deve-se apontar a causa e efeito, da maneira mais detalhada possível, completando-se a Figura 5-2.

Na etapa 4, deve-se ratificar, entre todos os integrantes da equipe FMEA R&R, que o entendimento dos modos de falha selecionados está balizado. Sugere-se compartilhar nesta fase os conceitos de MSA e notificar a equipe que será analisada a concordância através de Reprodutividade. Sabendo que a sua habilidade de atribuir a nota também será avaliada, o especialista tem motivo e desperta-se o comprometimento, bem como promove-se a importância e responsabilidade durante a avaliação dos modos de falha do FMEA R&R.

Para desenvolver a etapa 5 do FMEA R&R, tem-se a atividade de desenvolvimento das Tabelas de Critério para classificação do FMEA R&R, cuja está fundamentada na revisão da literatura do Capítulo 2, que destaca que os critérios adotados para a Severidade, Ocorrência e Detecção, são os pontos mais críticos do FMEA, uma vez que é a fonte quantitativa para a avaliação. Assim, para solucionar este problema, nesta etapa 5, estabeleceu-se referências para que seja possível existir uma relação com a performance, manutenção e custo, do objeto em análise, conforme defendido por diversos autores e discutido no Capítulo 2. A finalidade desta etapa é definir um padrão de discernimento e entendimento dos conceitos para avaliação dos índices de risco do FMEA. Logo, na etapa 5 da metodologia do FMEA R&R, deve-se identificar a frequência de ocorrências e modelar a tabela de referência dos índices de prioridade, de acordo com estes conceitos. Na Tabela 5-1, Tabela 5-2 e Tabela 5-3, apresenta-se a sugestão de padronização para a análise dos índices de risco do FMEA e os fatores envolvidos com mesmos, de forma que cada modo de falha possa ser avaliado de acordo com alguma escala de referência quantitativa. Estes parâmetros podem ser ajustados, de acordo com as características do Produto, Sistema, Projeto, Processo e Serviço.

FMEA R&R							
Nome:		Data:			Tema:		
#	<input type="checkbox"/> Processo <input type="checkbox"/> Projeto	<u>Modo de Falha</u>	<u>Causa</u>	<u>Efeito</u>	<u>Severidade</u>	<u>Avaliação</u>	
	<input type="checkbox"/> Sistema <input type="checkbox"/> Produto					<u>Ocorrência</u>	<u>Deteccção</u>
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							

Figura 5-2 Formulário de avaliação - FMEA R&R

A Tabela 5-1 mostra os critérios para se definir a Severidade, na qual deve-se distribuir ao longo da escala escolhida, sugere-se utilizar a escala de 1 a 10, que ainda pode ser graduada em cinco faixas, isto é, Mínima, Pequena, Moderada, Alta e Muito Alta. Estas faixas possibilitam ao avaliador uma referência de grandeza da Severidade e, inclusive, deve ser modelada pela equipe responsável, de acordo com os dados do processo.

Tabela 5-1 Tabela de Critério FMEA R&R - Severidade

FMEA R&R			
Severidade			
Escala	Faixa de referência	Critérios	
		Performance	Manutenção ou Custo
1	Mínima	Não afeta a performance	Não exige
2	Pequena	Tem efeito pequeno na performance ou causa pequeno impacto	Não onera a manutenção e não tem custo
3			
4	Moderada	Deteriorização significativa no desempenho do processo com cliente insatisfeito	Tem manutenção e gera algum custo (processo parado ou material)
5			
6			
7	Alta	Sistema deixa de funcionar e grande descontentamento do cliente	Frequência de manutenção grande, impacta em parada da linha e possui custo elevado
8			
9	Muita Alta	Idem ao anterior, porém afeta a segurança	Idem ao anterior, porém afeta a segurança
10			

Para a Ocorrência, deve-se modelar a sua escala a partir da frequência ou recorrência do problema/modo de falha, de acordo com os dados históricos do processo. Na Tabela 5-2, tem-se que a escala de pontuação deve ser considerada proporcional à ocorrência, ou seja, quanto maior a frequência maior deve ser a nota atribuída a este parâmetro.

Tabela 5-2 Tabela de Critério FMEA R&R - Ocorrência

FMEA R&R			
Ocorrência			
Escala	Faixa de referência	Critérios	
		Performance	Manutenção ou Custo
1	Remota	1:1.000.000	Não exige
2	Pequena	1:20.000	Não onera a manutenção e não tem custo
3		1:4.000	
4	Moderada	1:1.000	Tem manutenção e gera algum custo (processo parado ou material)
5		1:400	
6		1:80	
7	Alta	1:40	Frequência de manutenção grande, impacta em parada da linha e possui custo elevado
8		1:20	
9	Muita Alta	1:8	Idem ao anterior, porém afeta a segurança
10		1:2	

Para a Detecção, de forma análoga à Severidade e Ocorrência, é possível modelar a sua escala, a partir de dados históricos do modo de falha ou através do Custo e/ou quantidade de manutenção do sistema analisado, conforme apresentado Tabela 5-3. Ainda, deve-se considerar a sua pontuação em escala inversamente proporcional, em outras palavras, quanto menos a detecção, maior deve ser a nota atribuída.

Tabela 5-3 Tabela de Critério FMEA R&R - Detecção

FMEA R&R			
Detecção			
Escala	Faixa de referência	Critérios	
		Performance	Manutenção ou Custo
1	Muito Grande	Certamente será detectado	Não exige
2			Não onera a manutenção e não tem custo
3			
4	Grande	Grande probabilidade de ser detectado	Tem manutenção e gera algum custo (processo parado ou material)
5			
6	Moderada	Provavelmente será detectado	Frequência de manutenção grande, impacta em parada da linha e possui custo elevado
7			
8			
9	Pequena	Provavelmente não será detectado	Idem ao anterior, porém afeta a segurança
10			
	Muito Pequena	Certamente não será detectado	

Então, a partir de cada modo de falha estabelecido na etapa 3 e as referências de índices de risco da etapa 5, pode-se na etapa 6, atribuir-se as notas ao FMEA R&R. Cada especialista pontua cada um dos modos de falha em termos de S, O e D, através do Formulário de avaliação - FMEA R&R, exposto na Figura 5-2.

O Líder do FMEA R&R, na etapa 7, desenvolve a abordagem quantitativa ao FMEA R&R, conforme estabelecido no Capítulo 3 e 4 desta Tese, por meio da análise de concordância por atributos, calculando-se o ICC, Kappa e Kendall. Em seguida, deve-se classificar os índices Kappa e Kendall, conforme estabelecido no Capítulo 4.1, a partir da Tabela 4-1 e Tabela 4-2, respectivamente.

Tabela 5-4 Formulário de Confiabilidade do FMEA R&R

FMEA R&R - ETAPA 8 e 9		
FMEA / PROCESSO:		
RESPONSÁVEL:		
EQUIPE:		
ÍNDICE DE	R&R	CONFIABILIDADE
SEVERIDADE	ICC = _____	() DESCARTAR / REFAZER
	Kappa = _____	() REVISAR
	Kendall = _____	() CONFIÁVEL
OCORRÊNCIA	ICC = _____	() DESCARTAR / REFAZER
	Kappa = _____	() REVISAR
	Kendall = _____	() CONFIÁVEL
DETECÇÃO	ICC = _____	() DESCARTAR / REFAZER
	Kappa = _____	() REVISAR
	Kendall = _____	() CONFIÁVEL
RPN	ICC = _____	() DESCARTAR / REFAZER
	Kappa = _____	() REVISAR
	Kendall = _____	() CONFIÁVEL
	EXCELENTE	

Na etapa 8, o Líder preenche o Formulário de Confiabilidade do FMEA R&R, exibido na Tabela 5-4, para cada resultado da abordagem quantitativa e os índices de risco avaliados, para os coeficientes de concordância ICC, Kappa e Kendall.

Além da abordagem quantitativa, no FMEA R&R, tem-se a etapa 9 de validação estatística, na qual é classificada a confiabilidade. Vale resgatar, que os resultados da análise de concordância através dos coeficientes de Kappa e Kendall, têm referência estabelecida nas Tabela 4-1 e Tabela 4-2 e, a combinação destes resultados produz múltiplas possibilidades de classificação. Por isso, para classificar o FMEA em termos de confiabilidade dos seus resultados para tomada de decisão, no modelo FMEA R&R proposto, a etapa 9 estabelece que, a partir do Formulário de Confiabilidade do FMEA R&R preenchido com os resultados das análises da abordagem quantitativa, a coluna de classificação de CONFIABILIDADE neste formulário da Tabela 5-4, deve ser realizada conforme classificações apresentadas na Tabela 5-5, para cada um dos índices de risco avaliados e coeficientes de concordância ICC, Kappa e Kendall.

Tabela 5-5 Classificação da Confiabilidade do FMEA R&R

FMEA R&R		
CLASSIFICAÇÃO DA CONFIABILIDADE DO FMEA		
DESCARTAR / REFAZER	REVISAR	CONFIÁVEL
Kappa = NÃO HÁ CONCORDÂNCIA Kendall = INACEITÁVEL	Kappa = LEVE Kendall = PÉSSIMO	Kappa = LEVE / MODERADO / BOM / PERFEITO Kendall = CONSIDERÁVEL / BOM / EXCELENTE
Kappa = NÃO HÁ CONCORDÂNCIA Kendall = PÉSSIMO	Kappa = LEVE Kendall = ATENÇÃO – REVISÃO	
Kappa = LEVE Kendall = INACEITÁVEL		

Dessa maneira, tem-se três classificações possíveis para o FMEA R&R, isto é, DESCARTAR / REFAZER, REVISAR e CONFIÁVEL. Na etapa 10, esta classificação é analisada, na qual deve-se tomar a decisão estatisticamente sobre a confiabilidade do FMEA R&R desenvolvido, onde:

- CONFIÁVEL, tem-se que os resultados da análise e atribuição das notas aos índices de risco ao FMEA R&R são confiáveis para tomada de decisão.
- REVISAR, neste caso é importante discutir com a equipe que as notas atribuídas não foram estatisticamente validadas em termos de concordância e o índice deverá ser reavaliado retornando-se à etapa 6. Deve-se seguir o fluxo do FMEA R&R e, caso o FMEA seja novamente classificado como REVISAR na etapa 10, para não culminar em um *looping* de revisões, deve-se seguir para etapa seguinte, pois as divergências são genuínas e fazem parte da incerteza do FMEA sob análise. Sobretudo, deve-se destacar para efeito de tomada de decisão que FMEA R&R não apresentou validação estatística.
- DESCARTAR / REFAZER, sugere-se que os resultados são estatisticamente subjetivos e o FMEA deve ser descartado, ou seja, os resultados não podem ser utilizados para tomada de decisão. Sendo assim, o FMEA R&R necessita ser reelaborado pelos responsáveis.

Após classificar o FMEA R&R, por fim, na etapa 11 deve-se elaborar o plano de ações para tratar os riscos e modos de falha identificados com maior RPN, estabelecer os responsáveis pelas ações e definir os prazos para cada um destes pontos, conforme formulário do ANEXO B.

Portanto, a fim de validar a eficiência da metodologia FMEA R&R, aplicou-se a proposta em uma análise de caso real da indústria, para observar se este modelo minimiza a subjetividade do FMEA e aumenta a confiabilidade dos seus resultados para a tomada de decisão.

5.3 Aplicação do FMEA R&R na indústria

O FMEA R&R proposto com a introdução dos conceitos de R&R fora aplicado em um caso de uma grande empresa do setor de logística multinacional, onde avaliou-se o processo de expedição da empresa.

Este experimento foi conduzido através das etapas da Figura 5-1, seguindo todas as diretrizes levantadas para minimizar a subjetividade existente nas avaliações pelos diferentes especialistas, durante o processo de elaboração do FMEA e, assim, melhorar a confiabilidade dos seus resultados.

5.3.1 Líder FMEA – Etapa 1

Para aplicar a metodologia proposta de FMEA R&R, a partir a primeira etapa do roteiro descrito na Figura 5-1, o líder do FMEA, com conhecimento das práticas envolvidas e treinado em FMEA, planejou o cronograma, levantou os dados e agendou as reuniões necessárias para realizar-se o FMEA R&R do processo escolhido. Este líder definiu o propósito de análise de risco, de acordo com o tipo de FMEA, isto é, Projeto, Serviço, Sistema, Produto ou Processo e, neste caso, se trata de um FMEA de Processo.

Em seguida, selecionou-se mais quatro especialistas com domínio do processo, para formar o time de avaliadores do FMEA R&R, no qual tem-se os seguintes perfis:

- Líder do FMEA R&R, gerente de projetos, com conhecimento sobre o processo e treinado em FMEA, identificado por TM1
- Gerente geral da planta industrial, com conhecimento sobre o processo e sem treinamento em FMEA, identificado por TM2
- Analista de qualidade, com conhecimento sobre o processo e treinado em FMEA, identificado por TM3
- Engenheiro de processos, sem conhecimento detalhado do processo e treinado em FMEA, identificado por TM4
- Engenheiro de processos, com conhecimento sobre o processo e sem treinamento em FMEA, identificado por TM5

De maneira geral, buscou-se organizar um time de avaliadores que fosse experiente e com perspectivas diferentes, que contribuíssem para garantir que o FMEA fosse considerado a partir de distintos pontos de vista do mesmo processo, relevando os riscos inerentes estabelecidos por um comitê diversificado.

Assim, planejou-se o cronograma de execução do FMEA R&R, de maneira que acomodasse a agenda de toda equipe selecionada, discutido no próximo Capítulo.

5.3.2 Etapa 2

De acordo com a etapa 3, o líder do FMEA definiu com o time o objetivo do FMEA R&R. Neste caso analisado, levando-se em consideração as necessidades técnicas que motivaram a avaliação dos riscos do processo via FMEA, o objetivo do FMEA R&R em questão é determinar quais eram os principais problemas do Processo de Expedição da empresa.

Após a definição do objetivo, o líder e os demais avaliadores definiram o escopo do FMEA R&R, no qual discutiu-se o que seria incluído e excluído da análise. Sendo assim, delimitou as análises aos riscos oferecidos à segurança do trabalho, problemas que pudessem causar divergências/erros para o cliente final, bem como a performance do processo. Os impactos relativos ao nível de qualidade das atividades não foram consideradas dentro deste escopo de análise.

5.3.3 Etapa 3

Levantou-se a relação dos problemas envolvidos no processo de expedição em questão, detalhando-se todos modos de falha potenciais na movimentação de produtos e matérias primas no armazém, que estivessem dentro do escopo de riscos. Discutiu-se potenciais falhas, com o intuito de alinhar todos os avaliadores quanto ao nível de conhecimento dos itens que estariam classificando, em termos de risco críticos ao processo.

Considerando a complexidade do processo, estabeleceu-se 21 conjuntos de modos de falha/causa/efeito para avaliação, o que resulta em um total de 63 análises para cada um dos cinco especialistas, sem repetições de avaliação. Com tudo isso, elaborou-se o Formulário de avaliação - FMEA R&R (Figura 5-2), disposto no Anexo C.

5.3.4 Etapa 4

Na sequência, questionou-se os especialistas quanto ao domínio do tema e os modos de falha potencial levantados, para garantir se os mesmos estavam confortáveis e em pleno conhecimento das causas e do processo, com o propósito de balizar novamente toda a equipe, para enfim, estabelecer os critérios para classificar os modos de falha.

Destacou-se esta etapa como importante, devido ao processo apresentar características complexas, com vários modos de falha e que pudesse colocar os especialistas em dúvidas e questionamentos que levassem a confundi-los.

Embora todas estas considerações, o retorno foi positivo e, conforme discussão aberta, avançou-se com os especialistas para a próxima etapa.

5.3.5 Etapa 5

Nesta etapa, precedente à classificação dos riscos, os critérios adotados para estabelecer os índices de riscos foram a performance do processo e o impacto financeiro dos efeitos das falhas selecionadas. Para isso, levantou-se todos os dados de referência para definir-se os critérios de análise do FMEA, relativos ao tempo e custo de eventuais paradas na expedição.

A partir deste consenso de toda equipe, elaborou-se em conjunto as Tabelas de Critério do FMEA R&R, das quais definiu-se que a Severidade, Ocorrência e Detecção, deveriam ser parametrizadas de acordo com a estrutura apresentada na Tabela 5-1, Tabela 5-2 e Tabela 5-3.

Disponibilizou-se estas referências em um quadro na sala de reunião do evento, para que, fielmente, a classificação fosse desenvolvida através da consulta às informações.

5.3.6 Etapa 6

Com base em todas as etapas anteriores, a fim de garantir que os conceitos de avaliação do processo sob análise estivessem claramente estabelecidos, realizou-se a atribuição de notas aos modos de falha.

Apresenta-se consolidada todas avaliações na Tabela 5-6, com as notas dos 21 modos de falhas conceituados pelos 5 especialistas, pontuadas em termos de Severidade, Ocorrência, Detecção e o RPN calculado.

Tabela 5-6 Tabela de pontuação do caso FMEA R&R

FMEA R&R																									
Failure	SEVERIDADE						OCORRÊNCIA						DETECÇÃO						RPN					PRIORIZAÇÃO	
	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	Média (S)	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	Média (S)	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	Média (S)	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	RPN	ORDEM
1	8	8	8	7	8	7,80	1	1	2	1	1	1	3	3	3	3	3	3	24	24	48	21	24	28	16
2	8	8	8	8	8	8,00	2	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	48	24	24	24	24	29	15
3	7	8	7	8	8	7,60	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	5	4	56	64	56	64	80	64	10
4	8	8	8	8	8	8,00	8	8	8	8	8	8	5	5	5	5	5	5	320	320	320	320	320	320	2
5	8	9	8	8	8	8,20	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	288	324	288	288	288	295	3
6	8	8	8	7	8	7,80	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	16	16	32	28	16	22	18
7	9	9	9	9	9	9,00	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	54	36	36	36	36	40	12
8	4	4	4	5	4	4,20	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	12	12	12	15	12	13	20
9	2	2	2	2	2	2,00	4	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	24	18	24	18	18	20	19
10	2	2	2	2	2	2,00	1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4	8	8	8	8	8	8	21
11	2	3	2	2	2	2,20	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	4	3	32	36	24	24	32	30	14
12	3	3	3	3	3	3,00	9	9	9	9	9	9	7	7	7	7	7	7	189	189	189	189	189	189	4
13	3	3	3	3	3	3,00	8	8	8	8	8	8	6	6	6	5	6	6	144	144	144	120	144	139	7
14	7	8	7	7	7	7,20	3	3	4	3	3	3	4	4	4	4	4	4	84	96	112	84	84	92	9
15	3	3	3	3	3	3,00	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	36	36	36	36	36	36	13
16	8	8	8	8	8	8,00	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	24	24	24	24	24	24	17
17	8	7	8	8	8	7,80	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	160	140	160	160	160	156	6
18	7	7	7	7	7	7,00	2	2	2	2	2	2	7	7	7	7	7	7	98	98	98	98	98	98	8
19	2	2	2	2	2	2,00	7	7	7	7	7	7	4	4	4	4	4	4	56	56	56	56	56	56	11
20	8	8	9	8	8	8,20	9	3	9	8	9	8	9	9	9	9	9	9	648	216	729	576	648	561	1
21	3	3	3	3	3	3,00	9	8	9	9	9	9	6	6	5	6	7	6	162	144	135	162	189	158	5

Deve-se salientar que as avaliações foram realizadas com a mesma sistemática de coleta de dados para não interferir nos resultados, isto é, o julgamento de cada um dos especialistas foi único e particular, sem influências, apenas os seus próprios conceitos.

5.3.7 Etapa 7: Abordagem Quantitativa

Nesta seção, apresenta-se a abordagem quantitativa com a análise do FMEA R&R, do qual analisou-se o grau de concordância dos especialistas através das quatro variáveis resposta do FMEA como sistema de medição, tomando cada índice de pontuação do FMEA como uma métrica variável por atributo discreta, na respectiva ordem:

- Severidade
- Ocorrência
- Detecção
- RPN: Índice de prioridade de risco

Para cada um dos índices acima, o FMEA R&R terá a análise GR&R para avaliar o desempenho de Reprodutividade em conjunto dos avaliadores, isto é, o exame do comportamento do time de avaliadores entre eles (*Between*). Dessa maneira, avaliou-se estatisticamente as notas atribuídas através dos índices de ICC, Fleiss' Kappa e Kendall.

5.3.7.1 Severidade

Analisou-se o nível de concordância dos especialistas para as avaliações relativas à Severidade. A Tabela 5-7 apresenta o ICC, com as avaliações dos especialistas concordando em 12 vezes, o que representa 57,14% da sua totalidade.

Tabela 5-7 Análise de Concordância para a Severidade (*Between*)

Avaliações	#Combinadas	Porcentagem	95% IC
21	12	57,14	(34,02; 78,18)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

Para a análise do coeficiente de Fleiss' Kappa, tem-se apresentado na Tabela 5-8 os resultados desta análise, onde $p - valor < 0,05$, o que permite-se concluir que as avaliações desenvolvidas pelo conjunto dos cinco especialistas para a Severidade é significativa. Assim, tem-se que o *Fleiss' Kappa* = 0,7643 e, segundo a Tabela 4-1, a concordância é classificada como BOM.

Tabela 5-8 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Severidade (*Between*)

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
2	0,9357	0,0690	13,5602	0,0000
3	0,9404	0,0690	13,6288	0,0000
4	0,7400	0,0690	10,7251	0,0000
5	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
7	0,6049	0,0690	8,7663	0,0000
8	0,6940	0,0690	10,0578	0,0000
9	0,6938	0,0690	10,0552	0,0000
Global	0,7643	0,0349	21,8778	0,0000

Analisando-se o coeficiente de concordância de Kendall, para a severidade avaliada pelos especialistas, da Tabela 5-9 verifica-se que é significativo o índice de Kendall para $DF = 20$ e $\alpha = 0,05$, pois obtemos $\text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{Severidade}} (X^2) = 95,7465$, isto é, $\text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{Severidade}} > \text{Chi} - \text{Qd}_{\text{crítico}}$.

Tabela 5-9 Coeficiente de Kendall para a Severidade (*Between*)

Coeficiente de Kendall	Chi - Qd	DF	P
0,9574	95,7465	20	0,0000

Assim, na análise de concordância por atributos entre observadores, confere-se que o cálculo para o índice de *Kendall* = 0,9574 (Tabela 5-9), o qual, de acordo com a Tabela 4-2, o FMEA quanto a Severidade é classificado como EXCELENTE.

Com a análise do coeficiente de Kendall, pode-se concluir que há evidência do consenso ao realizá-lo pelos especialistas, isto é, concordam em grupo.

5.3.7.2 Ocorrência

Analisou-se o nível de concordância dos especialistas para as avaliações relativas à Ocorrência. A Tabela 5-10 apresenta o ICC, o qual houve concordância geral dos avaliadores em 15 avaliações e a porcentagem de combinações das avaliações é de 71,43% entre eles:

Tabela 5-10 Concordância observadores para a Ocorrência (*Between*)

Avaliações	# Combinadas	Porcentagem	95% IC
21	15	71,43	(47,82; 88,72)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

A Tabela 5-11 a seguir apresenta a estatística de Fleiss' Kappa e pode-se conferir que a análise de concordância por atributo, por meio deste coeficiente, é significativa, com o $p - \text{valor} = 0,0010$, ou seja, $p - \text{valor} < 0,05$.

Tabela 5-11 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Ocorrência (*Between*)

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
1	0,8886	0,0690	12,8778	0,0000
2	1,0000	0,0690	14,4914	0,0000
3	0,7527	0,0690	10,9083	0,0000
4	0,8984	0,0690	13,0198	0,0000
6	1,0000	0,0690	14,4914	0,0000
7	1,0000	0,0690	14,4914	0,0000
8	1,0000	0,0690	14,4914	0,0000
9	0,7647	0,0690	11,0828	0,0000
Geral	0,8504	0,0270	31,4845	0,0010

Analisando-se o índice de *Fleiss' Kappa* = 0,8504 é possível dizer que houve concordância entre os avaliadores e a classificação do FMEA quanto a Ocorrência é BOM.

A análise do coeficiente de concordância de Kendall é apresentada na Tabela 5-12, onde o *P - valor* = 0,0000, e o coeficiente é significativo, bem com $\text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{crítico}} (X^2) = 97,9798$ com o $\text{Chi} - Qd_{\text{Ocorrência}} < \text{Chi} - Qd_{\text{crítico}}$.

Tabela 5-12 Coeficiente de Kendall para a Ocorrência (*Between*)

Coeficiente	Chi-QdOcorrência	DF	P
0,9797	97,9798	20	0,0000

O coeficiente de concordância de Kendall para os modos de falha, é *Kendall* = 0,9797, o que indica que os especialistas concordaram entre si no processo de atribuição das notas da ocorrência, pois, segundo a Tabela 4-2, o FMEA é classificado como EXCELENTE.

5.3.7.3 Detecção

Analisou-se a concordância dos especialistas para as avaliações relativas à Detecção. O ICC é apresentado na Tabela 5-13, na qual pode-se observar que em 14 modos de falha avaliados os conceitos são iguais, isto representa 66,67%.

Tabela 5-13 Análise de Concordância para Detecção (*Between*)

Avaliações	# Combinadas	Porcentagem	95% IC
21	14	66,67	(43,03; 85,41)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

A Tabela 5-14 apresenta a estatística de Fleiss' Kappa, com coeficiente significativo, onde o seu $p - \text{valor} < 0,05$ e $\text{Fleiss' Kappa} = 0,7920$. Este resultado, permite estatisticamente classificar o FMEA como BOM.

Tabela 5-14 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Detecção (*Between*)

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
1	0,4852	0,0690	7,0326	0,0000
2	0,5800	0,0690	8,4050	0,0000
3	0,8295	0,0690	12,0213	0,0000
4	0,8722	0,0690	12,6394	0,0000
5	0,7366	0,0690	10,6747	0,0000
6	0,7647	0,0690	11,0828	0,0000
7	1,0000	0,0690	14,4914	0,0000
9	1,0000	0,0690	14,4914	0,0000
Global	0,7920	0,0301	26,3462	0,0000

O coeficiente de concordância de Kendall, exibido na Tabela 5-15 a seguir, apresenta $P - \text{valor} < 0,05$ significativo e, o índice geral de concordância entre os avaliadores para a Detecção, com o resultado de $\text{Kendall} = 0,9818$.

Tabela 5-15 Coeficiente de Kendall para Detecção (*Between*)

Coeficiente	Chi-Qd _{detecção}	DF	P
0,9818	98,1779	20	0,0000

A partir do índice de Kendall calculado para o FMEA, tem-se que o mesmo pode ser classificado como EXCELENTE. Com esses resultados, pode-se dizer que o FMEA realizado em relação ao índice de Detecção está dentro dos limites que consideram que os jurados concordaram entre eles.

5.3.7.4 RPN – Número de Prioridade de Risco

Mesmo sabendo que os resultados dos índices apresentados anteriormente são satisfatórios, o RPN, último item do FMEA R&R, também foi analisado por GR&R atributos. O objetivo dessa análise no FMEA R&R é avaliar se há concordância ou um erro acumulado que se propagou ainda mais no resultado do RPN.

Através da Tabela 5-16 pode-se verificar o ICC, com a concordância geral em 7 dos 21 resultados RPN para os modos de falha e, em termos percentuais, tem-se 33,33%.

Tabela 5-16 Análise de Concordância para RPN (*Between*)

Avaliações	# Combinadas	Porcentagem	95% IC
21	7	33,33	(14,59; 56,97)

Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

Para o estatística de Fleiss' Kappa, o valor calculado é significativo, uma vez que $p - valor < 0,05$, no qual $Fleiss' Kappa = 0,5660$. Com este resultado, pode-se classificar o RPN, segundo Fleiss' Kappa, como é MODERADO.

Tabela 5-17 Coeficiente de Fleiss' Kappa para RPN (*Between*)

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
8	1,0000	0,0690	14,4914	0,0000
12	0,7401	0,0690	10,7251	0,0000
15	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
16	0,4852	0,0690	7,0326	0,0000
18	0,4852	0,0690	7,0326	0,0000
21	-0,0194	0,0690	-0,2814	0,6108
24	0,6703	0,0690	9,7140	0,0000
28	-0,0194	0,0690	-0,2814	0,6108
32	0,1421	0,0690	2,0600	0,0197
36	0,6236	0,0690	9,0376	0,0000
48	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
54	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
56	0,7704	0,0690	11,1643	0,0000
64	0,2354	0,0690	3,4118	0,0003
80	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
84	0,4852	0,0690	7,0326	0,0000
96	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
98	1,0000	0,0690	14,4914	0,0000
112	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
120	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
135	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
140	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
144	0,7401	0,0690	10,7251	0,0000
160	0,7401	0,0690	10,7251	0,0000
162	0,2354	0,0690	3,4118	0,0003
189	1,0000	0,0690	14,4914	0,0000
216	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
288	0,7401	0,0690	10,7251	0,0000
320	1,0000	0,0690	14,4914	0,0000
324	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
576	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
648	0,2354	0,0690	3,4118	0,0003
729	-0,0096	0,0690	-0,1393	0,5554
Global	0,5660	0,0163	34,7545	0,0000

Por fim, analisou-se o coeficiente de concordância de Kendall, apresentado na Tabela 5-18 a seguir, onde $\text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{crítico}} (X^2) = 98,5033$, isto é, $\text{Chi} - Qd_{RPN} > \text{Chi} - Qd_{\text{crítico}}$ e $p - \text{valor} < 0,05$, do qual permite-se concluir que as avaliações desenvolvidas pelo conjunto dos cinco especialistas para o RPN é significativa. A partir disso, tem-se para $Kendall = 0,9850$, ou seja, resultado que classifica o FMEA R&R quanto ao RPN como EXCELENTE.

Tabela 5-18 Coeficiente de Kendall para RPN (*Between*)

Coeficiente	Chi - Qd RPN	DF	P-Valor
0,9850	98,5033	20	0,0000

5.3.8 Etapas 8

Classificou-se o nível de concordância das avaliações dos cinco especialistas utilizando-se os coeficientes de concordância de ICC, Fleiss' Kappa e de Kendall e verificou-se a classificação da confiabilidade do FMEA R&R em relação ao processo de avaliação, conforme Tabela 5-19.

Tabela 5-19 Formulário de Confiabilidade do FMEA

ETAPA - 8 / 9		
FMEA / PROCESSO: PROCESSO DE EXPEDIÇÃO		
RESPONSÁVEL: TM1		
EQUIPE: TM1, TM2, TM3, TM4 E TM1		
ÍNDICE DE	R&R	CONFIABILIDADE
SEVERIDADE	ICC = 57,14 %	<input type="checkbox"/> DESCARTAR / REFAZER
	Kappa = BOM	<input type="checkbox"/> REVISAR
	Kendall = EXCELENTE	<input checked="" type="checkbox"/> CONFIÁVEL
OCORRÊNCIA	ICC = 71,43 %	<input type="checkbox"/> DESCARTAR / REFAZER
	Kappa = BOM	<input type="checkbox"/> REVISAR
	Kendall = EXCELENTE	<input checked="" type="checkbox"/> CONFIÁVEL
DETECÇÃO	ICC = 66,67 %	<input type="checkbox"/> DESCARTAR / REFAZER
	Kappa = BOM	<input type="checkbox"/> REVISAR
	Kendall = EXCELENTE	<input checked="" type="checkbox"/> CONFIÁVEL
RPN	ICC = 33,33%	<input type="checkbox"/> DESCARTAR / REFAZER
	Kappa = MODERADO	<input type="checkbox"/> REVISAR
	Kendall = EXCELENTE	<input checked="" type="checkbox"/> CONFIÁVEL

A partir da Tabela 5-19, pode-se observar que o FMEA realizado tem conceitos Kappa BOM e, Kendall EXCELENTE, para os índices de risco Severidade, Ocorrência e Detecção, o que classifica estes índices como CONFIÁVEL para tomada de decisão. Para o RPN, o resultado também é classificado como CONFIÁVEL, apesar de Kappa ser MODERADO, ainda assim, é um resultado satisfatório, visto que Kendall é EXCELENTE, o maior conceito possível.

5.3.9 Etapa 9

Com os resultados obtidos a partir da análise de GR&R por atributos do Capítulo anterior, obteve-se todas informações para classificar o FMEA R&R, na etapa 9, de acordo com a Tabela 5-6, como a CONFIÁVEL.

5.3.10 Etapa 10

A partir da Tabela 5-19 preenchida com o resultado final sobre a confiabilidade do FMEA R&R que fora conduzido, o Líder FMEA pode estatisticamente validá-lo como CONFIÁVEL para a tomada de decisões sobre a priorização dos riscos do processo analisado.

5.3.11 Etapa 11

Por fim, após classificar o FMEA R&R como CONFIÁVEL, na etapa 11 elaborou-se um plano de ações para tratar as causas identificadas com maior RPN, bem como estabeleceu-se os responsáveis pelas ações e definiu-se os prazos para cada um destes pontos. O formulário deste caso real da indústria está no ANEXO D.

5.4 Conclusões sobre o FMEA R&R

Neste capítulo, apresentou-se a análise dos riscos potenciais de um caso real da indústria, conduzido através da metodologia proposta nesta Tese, o FMEA R&R. Aplicou-se todas as etapas desta metodologia, com o objetivo de avaliar se o modelo de FMEA R&R garante e/ou contribui para minimizar a subjetividade presente no FMEA e aumentar a confiabilidade da ferramenta.

Assim, pôde-se observar que a metodologia FMEA R&R, durante o processo de atribuição de suas notas neste caso, não apresentou subjetividade das avaliações dos especialistas selecionados.

Portanto, com base neste resultado, apesar do experimento contar com muitos modos de falha, o que implica em 63 avaliações para cada especialista, os mesmos convergiram as suas opiniões. Sobretudo, pode-se concluir que a metodologia FMEA R&R, apesar da limitação do estudo de caso e do ponto de vista estatístico, fornece as diretrizes eficientes e necessárias que possibilitaram desenvolver um FMEA que não é subjetivo. Em outras palavras, observando-se a concordância entre as notas atribuídas pela equipe, esta é uma metodologia que possibilita alcançar os resultados classificados nesta pesquisa como confiáveis, essencial para a tomada de decisões a partir do FMEA.

6 CONCLUSÃO

Nesta Tese, realizou-se uma abordagem para FMEA baseada em métodos quantitativos, através da análise do sistema de medição por atributos e suas ferramentas de análise de Repetitividade e Reprodutividade.

A partir da revisão da literatura, discutida neste documento, observou-se que diversas pesquisas apontam que os resultados do FMEA possuem viés de subjetividade, posto que os seus resultados são gerados com base na interpretação e conceito de seres humanos, que são por sua própria natureza, tendenciosos. A partir desta premissa, motivou-se o desenvolvimento desta pesquisa, com o escopo estruturado em duas partes: a primeira tem o objetivo de abordar quantitativamente o processo de atribuição das notas do FMEA e a segunda desenvolver uma análise crítica, propondo-se um novo modelo.

A pesquisa de abordagem quantitativa foi organizada através da análise estatística de quatro casos de FMEA: Tradicional, Multi-critério, FMEA Experimental (com Repetitividade) e Fuzzy. Em cada um dos casos, analisou-se estatisticamente a sua subjetividade, para realizar inferências quanto ao nível de confiabilidade do FMEA. Para tanto, modelou-se esta abordagem por meio da avaliação de Reprodutividade e Repetitividade do FMEA, a fim de verificar a habilidade de avaliação de especialistas, quanto à atribuição de suas notas, isto é, verificar o nível de aleatoriedade desta atividade. Selecionou-se os índices de concordância ICC, Fleiss' Kappa e Kendall, para classificação do FMEA, utilizando-se faixas de aceitabilidade para cada um destes índices. Vale ressaltar, que as faixas de referência de classificação e aceitabilidade do coeficiente de Kendall, é uma proposta nova, desenvolvida nesta Tese, a qual possibilita o relacionamento dos valores deste índice através de uma escala de confiabilidade.

Assim, a partir da abordagem quantitativa dos quatro casos, inferiu-se sobre a qualidade dos resultados do FMEA, do ponto de vista estatístico, onde verificou-se que a confiabilidade desta ferramenta é questionável, pois, apesar da limitação da pesquisa aos casos analisados, atesta-se o viés do FMEA. Os resultados da abordagem quantitativa e observações desta Tese, vão de encontro com essas premissas da literatura e as reafirmam, visto que, ao longo da abordagem, foi possível identificar e constatar fraquezas do FMEA, como a tendenciosidade, a falta de concordância (*within e between*) e a subjetividade do processo de atribuição de notas.

Com base nos resultados e conclusão da abordagem quantitativa ao FMEA, efetuou-se uma análise crítica para identificar e estabelecer quais são os problemas que causam a subjetividade da ferramenta e, assim, interferem na confiabilidade dos seus resultados para tomada de decisão. Nesta etapa, destacou-se os principais fatores que tem correlação com a subjetividade do FMEA, como a liderança para gestão do FMEA, a escala de Severidade, Ocorrência e Detecção, o processo de definição dos modos de falha, a equipe avaliadora do FMEA e o tipo de FMEA. Além disso, neste modelo, a utilização dos conceitos de R&R, para medir o desempenho em Reprodutividade da equipe, fomenta a responsabilidade no processo de avaliação.

À vista disso, nesta Tese propõem-se um novo modelo de FMEA, chamado de “FMEA R&R”. Este modelo tem como objetivo minimizar a subjetividade, através de diretrizes que suprimem o viés de discordância do processo de avaliação dos índices de risco S, O e D e, de forma a maximizar a confiabilidade desta ferramenta para tomada de decisão. Para isto, consolidou-se uma estrutura metodológica com todas as melhorias observadas que poderiam causar o viés do FMEA e estabeleceu-se um roteiro de desenvolvimento e aplicação para o FMEA, na forma de fluxograma etapa-a-etapa.

Então, aplicou-se o FMEA R&R em um caso real da indústria, com todas as etapas e diretrizes desta metodologia, para validar a proposta e verificar o desempenho deste modelo em relação a minimização da subjetividade do FMEA e a garantia da confiabilidade para tomada de decisão. Analisou-se um processo de expedição de produtos de uma grande empresa de logística multinacional, onde aplicou-se todas as etapas da metodologia proposta, para avaliar 21 modos de falha por cinco especialistas.

Com o resultado da proposta aplicado na indústria, pode-se concluir que o FMEA R&R, através dos preceitos extraídos da abordagem quantitativa, possibilitou desenvolver um FMEA que não é subjetivo, uma vez que o resultado da análise de concordância das notas atribuídas pelos especialistas à S, O, D e o RPN, foram classificadas como CONFIÁVEL. Em outras palavras, o FMEA R&R, com todas as diretrizes estabelecidas em sua estrutura, no caso aplicado, foi eficiente e contribuiu para a minimização da subjetividade do FMEA e garantia da confiabilidade dos seus resultados para a tomada de decisão.

6.1 Considerações finais

Nesta Tese, questionou-se o viés do FMEA e apresentou-se informações importantes sobre esta ferramenta que já fora citada em obras da literatura, entretanto, nunca havia se realizado uma pesquisa específica e completa que permitisse inferir e concluir estatisticamente sobre a sua confiabilidade.

Sobretudo, apesar da limitação desta pesquisa aos casos, cenários e tipos de FMEA analisados, de maneira geral, a principal contribuição desta Tese é a introdução da análise estatística como etapa fundamental para identificar e avaliar sua confiabilidade.

Por meio desta avaliação, pode-se definir se os índices do FMEA avaliados são confiáveis e, através das faixas de aceitabilidade e classificação do FMEA proposta nesta obra, o FMEA deverá ser revisto ou descartado, pois os seus resultados não são confiáveis para a tomada de decisão.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros pesquisas que excedam as limitações desta pesquisa, a fim de extrair mais informações sobre o FMEA em outros cenários e utilizando-se outros coeficientes estatísticos.

Nesta Tese, apenas os três tipos mais comuns de FMEA na literatura e indústria, isto é, o FMEA Tradicional, Multi-critério e Fuzzy, foram apresentados e discutidos na abordagem quantitativa dos quatro casos. Além disso, aplicou-se o modelo de FMEA R&R proposto, em apenas um caso da indústria. Logo, sugere-se uma investigação detalhada e aplicação desta pesquisa a outros tipos de FMEA, em nível de Sistema, Serviço, Produto e Projeto, bem como em outras áreas da indústria como automobilística, aviação e serviços, a fim de verificar o desempenho do modelo FMEA R&R e obter conclusões que possam ser mais generalizadas.

Finalmente, sugere-se que o material desta Tese seja fonte de informação para treinamentos em FMEA, bem como especificamente sobre análise de concordância de Repetitividade e Reprodutividade para o próprio FMEA e/ou outras ferramentas qualitativas.

REFERÊNCIAS

- ABDELGAWAD, M.; FAYEK, A. R. Risk management in the construction industry using combined fuzzy FMEA and fuzzy AHP. **Journal of Construction Engineering and Management**, 2010.
- AGRESTI, A. **A model for agreement between ratings on an ordinal scale**. Biometrics, 1988.
- AIAG; **Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)** - Reference Manual, Fourth Edition, 2008
- AIAG; **Measurement System Analysis. Reference Manual**, 3rd ed. Automotive Industry Action Group, Detroit, MI, 2010.
- ALLEN, M. J.; YEN, W. M. **Introduction to Measurement Theory**. Brooks/Cole, Monterey, CA, 1979.
- ALVARADO, F. P. Análisis de concordancia de atributos. **Tecnologia en Marcha**, v. 21, n. 4, p. 29–35, out-dez, 2008.
- APPOLINÁRIO, F. **Metodologia da ciência** – filosofia e prática da pesquisa. São Paulo: Editora Pioneira Thomson Learning, 2006.
- ARABIAN-HOSEYNABADI, H.; ORAEE, H.; TAVNER, P. J. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for wind turbines. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 32, n. 7, p. 817–824, 2010.
- ARAÚJO, A. **Metodologia FMEA-Fuzzy aplicada à gestão de indicadores de continuidade individuais de sistemas de distribuição de energia elétrica**, Tese - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Engenharia Elétrica. 2008.
- ASME; Section VIII Division 1 – **American Society for Mechanical Engineering**, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.
- BAHRAMI, M.; BAZZAZ, D. H.; SAJJADI, S. M. Innovation and Improvements In Project Implementation and Management; Using FMEA Technique. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 41, p. 418–425, 2012.
- BARENDS, D. M. Risk analysis of analytical validations by probabilistic modification of FMEA. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, v. 64-65, p. 82–86, maio 2012.
- BELZER, R. B. Getting beyond grin and bear it in the practice of risk management. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 72, n. 2, p. 137-148, 2001.
- BEN-DAYA, M.; RAOUF, A. A revised failure mode and effects analysis model. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 13, 43–47, 1996.
- BERTSCHE, B. **Reliability in Automotive and Mechanical Engineering: Determination of Component and System Reliability**. Berlin: Springer. 2008.

- BEVILACQUA, M., BRAGLIA, M., & GABBRIELLI, R. Monte Carlo simulation approach for a modified FMECA in a power plant. **Quality and Reliability Engineering International**, 16, 313–324, 2000.
- BOOKER, J.D.; RAINES, M.; SWIFT, K.G. **Designing Capable and Reliable Products**. Elsevier. 2001.
- BOWLES, J. B. e PELÁEZ, C. E. Using fuzzy cognitive maps as a system model for failure modes and effects analysis. **Information Science**. v. 88, n. 1-4, pp. 177-199, 1996.
- BOWLES, J. B., & PELÁEZ, C. E. Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, 50, 203–213, 1995.
- BRAGLIA, M. MAFMA: multi-attribute failure mode analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 17, 1017–1033, 2000.
- BRAGLIA, M., & BEVILACQUA, M. Fuzzy modelling and analytical hierarchy processing as a means of quantifying risk levels associated with failure modes in production systems. **Technology, Law and Insurance**, 5, 125–134, 2000.
- BRAGLIA, M.; FANTONI, G.; FROSOLINI, M. The house of reliability. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 24, 420–440, 2007.
- BRAGLIA, M.; FROSOLINI, M.; MONTANARI, R. Fuzzy criticality assessment model for failure modes and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 20, 503–524, 2003a.
- BRAGLIA, M.; FROSOLINI, M.; MONTANARI, R. Fuzzy TOPSIS approach for failure mode, effects and criticality analysis. **Quality and Reliability Engineering International**, 19, 425–443, 2003b.
- BRYMAN, A. **Research methods and Organization studies**. London: Unwin Hyman, 1989.
- BURDICK, R. K.; BORROR, C. M.; MONTGOMERY, D. C. “A Review of Methods for Measurement Systems Capability Analysis”. **Journal of Quality Technology** 35(4), pp. 342–354, 2003.
- CARMIGNANI, G. An integrated structural framework to cost-based FMECA: The priority-cost FMECA. **Reliability Engineering and Systems Safety**, 94, 861–871, 2009.
- CARPITELLA, SILVIA; CERTA A, ANTONELLA; IZQUIERDO B, JOAQUÍN; LA FATA A, CONCETTA MANUELA. A combined multi-criteria approach to support FMECA analyses: A real-world case. **Reliability Engineering and System Safety**, 2018.
- CHANG, C. L.; WEI, C. C.; LEE, Y. H. **Failure mode and effects analysis using fuzzy method and grey theory**. *Kybernetes*, 28, 1072–1080, 1999.
- CHANG, C. L.; LIU, P. H.; WEI, C. C. Failure mode and effects analysis using grey theory. **Integrated Manufacturing Systems**, 12, 211–216, 2001.
- CHANG, J. R.; CHANG, K. H.; LIAO, S. H.; CHENG, C. H. The reliability of general vague fault-tree analysis on weapon systems fault diagnosis. **Soft Computing**, 10, 531–542, 2006.

- CHANG, D. S.; SUN, K. L. P. Applying DEA to enhance assessment capability of FMEA. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 26, 629–643, 2009.
- CHANG, K.-H. Evaluate the orderings of risk for failure problems using a more general RPN methodology. **Microelectronics Reliability**, v. 49, n. 12, p. 1586–1596, dez. 2009.
- CHANG, K. H. Evaluate the orderings of risk for failure problems using a more general RPN methodology. **Microelectronics Reliability**, 49, 1586–1596, 2009.
- CHANG, K. H.; CHENG, C. H. A risk assessment methodology using intuitionistic fuzzy set in FMEA. **International Journal of Systems Science**, 41, 1457–1471, 2010.
- CHANG, K. H.; WEN, T. C. A novel efficient approach for DFMEA combining 2-tuple and the OWA operator. **Expert Systems with Applications**, 37, 2362–2370, 2010.
- CHANG, K. H.; CHENG, C. H.; CHANG, Y. C. Reprioritization of failures in a saline supply system using an intuitionistic fuzzy set ranking technique. **Soft Computing**, 14, 285–298, 2010.
- CHANG, K. H.; CHENG, C. H. Evaluating the risk of failure using the fuzzy OWA and DEMATEL method. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 22, 113–129, 2011.
- CHANG, K.-H.; CHANG, Y.-C.; TSAI, I.-T. Enhancing FMEA assessment by integrating grey relational analysis and the decision making trial and evaluation laboratory approach. **Engineering Failure Analysis**, v. 31, p. 211–224, 2013.
- CHEN, J. K. Utility priority number evaluation for FMEA. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, 7, 321–328, 2007.
- CHEN, L. H.; KO, W. C. Fuzzy approaches to quality function deployment for new product design. **Fuzzy Sets and Systems**, 160, 2620–2639, 2009a.
- CHEN, L. H.; KO, W. C. Fuzzy linear programming models for new product design using QFD with FMEA. **Applied Mathematical Modelling**, 33, 633–647, 2009b.
- CHIN, K. S.; CHAN, A.; YANG, J. B. Development of a fuzzy FMEA based product design system. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2008.
- CHIN, K. S.; WANG, Y. M.; POON, G. K. K.; YANG, J. B. Failure mode and effects analysis by data envelopment analysis. **Decision Support Systems**, 48, 246–256, 2009a.
- ChIn, K. S.; WANG, Y. M.; POON, G. K. K.; YANG, J. B. Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach. **Computers & Operations Research**, 36, 1768–1779, 2009b.
- CHIOZZA, M.L.; PONZETTI, C. FMEA: A model for reducing medical errors. **Clinica Chimica Acta**, v.404, n.1, p.75-78, 2009
- CLARKE, C. **Automotive Production Systems and Standardisation: From Ford to the Case of Mercedes-Benz**. Physica-Verlag Heidelberg, 2005.
- CLARKSON, P.J.; SIMONS, C.; ECKERT, C. Predicting Change Propagation in Complex Design. **Journal of Mechanical Design**, v.126, n.5, p.788-797. 2004.
- CROWE, D., FEINBERG, A. Design for Reliability Approach, Development and Results. **Technical Press**, Morgan Hill, California. FLEISS, 1981.

- RUSSOMANNO, D.J.; BONNELL, D. R.; BOWLES, J. B. Viewing computer-aided failure modes and effects analysis from an artificial intelligence perspective, **Integrated Computer-Aided Eng**, 1994.
- DALOSTO, DIOGO NUNES. Análise da consistência do FMEA: Uma abordagem quantitativa à uma ferramenta qualitativa. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – **Universidade Federal de Itajubá**, Itajubá, 2015.
- DASS, A.; SRIVASTAVA, R. S.; SINGH, J. Utilization of waste chalk from fertilizer industry as filler in building materials. **Building and Environment**, 1993.
- DE MAST, J.; VAN WIERINGEN, W. Measurement system analysis for bounded ordinal data. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 20, n. December 2003, p. 383–395, 2004.
- DE MAST, J.; VAN WIERINGEN, W. N. Measurement system analysis for categorical measurements: Agreement and kappa-type indices. **Journal of Quality Technology**, v. 39, p. 191–202, 2007.
- DONG, C. Failure mode and effects analysis based on fuzzy utility cost estimation. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 24, 958–971, 2007.
- EBELING, C. **An introduction to reliability and maintainability engineering**. New York: Tata McGraw-Hill Company, 2000.
- FONSECA, M. P. A **Análise Do Sistema De Medição (MSA) como ferramenta no controle de processos em uma indústria de dispositivos médicos descartáveis**. Curso De Engenharia De Produção Da Universidade Federal De Juiz De Fora, 2008.
- FORD Motor Company. **Potential failure mode and effects analysis (FMEA) reference manual**, 1988.
- FORD, E.C.; GAUDETTE, R.; MYERS, L.; VANDERVER, B.; ENGINEER, L.; ZELLARS, R.; SONG, D.Y.; WONG, J.; DEWEESE, T.L. Evaluation of Safety in a Radiation Oncology Setting Using Failure Mode and Effects Analysis. **International Journal of Radiation Oncology*Biological*Physics**, v.74, n.3, p.852-858. 2009.
- FRANCESCHINI, F.; GALETTO, M. A new approach for evaluation of risk priorities of failure modes in FMEA. **International Journal of Production Research**, 39, 2991–3002, 2001.
- GANDHI, O. P.; AGRAWAL, V. P. FMEA—A diagraph and matrix approach. **Reliability Engineering & System Safety**, 35, 147–158, 1992.
- GARCIA, P. A. A.; SCHIRRU, R.; FRUTUOSO, P. F. A fuzzy data envelopment analysis approach for FMEA. **Progress in Nuclear Energy**, 46, 359–373, 2005.
- GARGAMA, H.; CHATURVEDI, S. K.. **Criticality assessment models for failure mode effects and criticality analysis using fuzzy logic**. IEEE Transactions on Reliability, 60, 102–110, 2011.
- GEUM, Y.; CHO, Y.; PARK, Y. A systematic approach for diagnosing service failure: Service-specific FMEA and grey relational analysis approach. **Mathematical and Computer Modelling**, 54, 3126–3142, 2011.

- GILCHRIST, W. Modelling failure modes and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 10, 16–23, 1993.
- GÖNCZY, L.; MAJZIK, I.; HORVÁTH, A.; VARRÓ, D.; BALOGH, A.; MICSKEI, Z.; PATARICZA, A. **Tool Support for Engineering Certifiable Software**. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, v.238, n.4, p.79-85, 2009.
- GUIMARÃES, A. C. F.; LAPA, C. M. Effects analysis fuzzy inference system in nuclear problems using approximate reasoning. **Annals of Nuclear Energy**, 31, 107–115, 2004.
- GUIMARÃES, A. C. F.; LAPA, C. M. F. **Fuzzy FMEA applied to PWR chemical and volume control system**. Progress in Nuclear Energy, 44, 191–213, 2004.
- GUIMARÃES, A. C. F.; LAPA, C. M. F. Hazard and operability study using approximate reasoning in light-water reactors passive systems. **Nuclear Engineering and Design**, 236, 1256–1263, 2006.
- GUIMARÃES, A. C. F.; LAPA, C. M. F. Fuzzy inference to risk assessment on nuclear engineering systems. **Applied Soft Computing**, 7, 17–28, 2007.
- GUIMARÃES, A. C. F.; LAPA, C. M. F.; MOREIRA, M. L. Fuzzy methodology applied to probabilistic safety assessment for digital system in nuclear power plants. **Nuclear Engineering and Design**, 241, 3967–3976, 2011.
- HAIPOUR, V.; KAZEMI, A.; MOUSAVI, S. M. A fuzzy expert system to increase accuracy and precision in measurement system analysis. **Measurement**, v. 46, n. 8, p. 2770–2780, 2013.
- HAWKINS, P.G.; WOOLLONS, D.J. Failure modes and effects analysis of complex engineering systems using functional models. **Artificial Intelligence in Engineering**, v.12, p.375-397. 1998.
- HELVACIOGLU, S.; OZEN, E. Fuzzy based failure modes and effect analysis for yacht system design. **Ocean Engineering**, v. 79, p. 131–141, 2014.
- HU, A. H.; HSU, C. W.; KUO, T. C.; WU, W. C. Risk evaluation of green components to hazardous substance using FMEA and FAHP. **Expert Systems with Applications**, 36, 7142–7147, 2009.
- ISO 5725. **Accuracy (trueness e precision) of measurement methods e result – Part 1: General principles e definitions**, ISO, 1994
- 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**, v.139, n.1-3, p.348-356. 2003.
- JOHNSON, N.; KOTZ, S. **Distributions in Statistics: Continuous Univariate Distributions**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1970.
- JUNIOR, A. V.; MIGUEL, P. A. C.; CARVALHO, M. M. Análise bibliométrica da literatura sobre os conceitos de product life cycle management, product development process e sustentabilidade e suas interfaces. 3º International Workshop Advances in Cleaner Production, **Anais**. São Paulo, SP, BR, 2011.

- KENDALL M.G.; BABINGTON-SMITH B. The problem of m rankings. **Annals of Mathematical Statistics**, 10, 275-287, 1939.
- KENDALL, M. G. **A new measure of rank correlation**. *Biometrika*, 1938.
- KENDALL, M. G.; SMITH, B. B. **The problem of m rankings**. *Ann. Math. Statist.*, 10, 275-28, 1939.
- KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. London: Griffin, 1948a.
- KENDALL, M. G. **The advanced theory of statistics**. Vol. 1. (4th Ed.) London: Griffin, 1948b.
- KENDALL, M. G. **Rank and product-moment correlation**. *Biometrika*, 86, 177-193, 1949.
- KERLINGER F.N.; LEE H. B. **Foundations of Behavioral Research** (4th ed). Harcourt: New York, 2000.
- KESKIN, G. A.; ÖZKAN, C. An alternative evaluation of FMEA: Fuzzy ART algorithm. **Quality and Reliability Engineering International**, 25, 647–661, 2009.
- KIDDER, L. H.. **Métodos de pesquisa nas relações sociais**. Volume 1: delineamentos de pesquisa. 4ª. ed., 3ª. reimpressão, São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária Ltda., 2004.
- KMENTA, S.; ISHII, K. Scenario-based failure modes and effects analysis using expected cost. **Journal of Mechanical Design**, 126, 1027, 2004.
- KOH, K.Y.; SEONG, P.H. SMV model-based safety analysis of software requirements. **Reliability Engineering & System Safety**, v.94, n.2, p.320-331. 2009
- KUTLU, A. C.; EKMEKÇIOĞ, M. Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. **Expert Systems with Applications**, 39(1), 61–67, 2012.
- LACITY, M. C.; WILLCOCKS, L. P.; ROTTMAN, J. W. Global outsourcing of back office services: lessons, trends, and enduring challenges. **Strategic Outsourcing: An International Journal**, v. 1, n. 1, p. 13-34, 2008.
- LANDIS, J.R.; KOCH, G.C. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**. 33, 159–174, 1977.
- LAURENT, R.T. Evaluating agreement with a gold standard in method comparison studies. **Biometrics**. 54, 537–545, 1998.
- LAURENTI, R. **Sistematização de problemas e práticas da análise de falhas potenciais no processo de desenvolvimento de produtos**. Tese de mestrado - Universidade Federal de São Carlos, p. 115, 2010.
- LAURENTI, R.; ROZENFELD, H.; FRANIECK, E. K. Avaliação da aplicação dos métodos FMEA e DRBFM no processo de desenvolvimento de produtos em uma empresa de autopeças. **Gestão & Produção**, v. 19, p. 841–855, 2012.
- LEGENDRE, P., Species associations: the Kendall coefficient of concordance revisited. **Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics**, v. 10, n. 2, p. 226-245, 2005.
- LEVIN, M.; KALAL, T.T. **Improving Product Reliability: Strategies and Implementation**. West Sussex, England: Wiley. 2003.

- LIN, L.I. A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. **Biometrics**. 45, 255–268, 1989.
- LIN, L.I. Assay validation using the concordance correlation coefficient. **Biometrics**. 48, 599–604, 1992.
- LIU, X.; LEE, S.C.; CASELLA, G.; PETER, G. F. Assessing agreement of clustering methods with gene expression microarray data. **Computational Statistics & Data Analysis**. 52, 5356–5366, 2008.
- LIU, H. C., LIU, L., BIAN, Q. H., LIN, Q. L., DONG, N., & XU, P. C. Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory. **Expert Systems with Applications**, 38, 4403–4415, 2011.
- LIU, H. C.; LIU, L.; LIU, N.; MAO, L. X. Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment. **Expert Systems with Applications**, 39, 12926–12934, 2012.
- LIU, H.-C. Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 4, p. 4403–4415, 2011.
- LIU, H.-C.; LIU, L.; LIU, N. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. **Expert Systems with Applications**, v. 40, n. 2, p. 828–838, fev. 2013.
- LUIZ SILVA, WELBERT. Experiência na implantação da rotina de análise de sistemas de medição em uma indústria de auto peças. **2nd International Conference on Advanced Measurement Techniques and Sensory Systems for Automotive Applications**. Itália, 2002.
- MADDOXX, M.E. “Error apparent”, **Industrial Engineer**, Vol. 37 No. 5, pp. 40-4, 2005.
- MARTINS, R. A.; MELLO, C. H. P.; TURRIONI, J. B. **Guia para elaboração de monografia e TCC em Engenharia de Produção**. São Paulo: Atlas, 2014.
- MIGUEL, P. A. C.; FLEURY, A.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N.; TURRIONI, J. B.; LEE HO, L.; MORABITO, R.; MARTINS, R. A.; PUREZA, V. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- MILAZZO, M.F.; ANCIONE, G.; LISI, R.; VIANELLO, C.; MASCHIO, G. Risk management of terrorist attacks in the transport of hazardous materials using dynamic geoevents. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v.22, n.5, p.625-633. 2009.
- MODARRES, M. **What Every Engineer Should Know About Reliability and Risk Analysis**. Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Hong Kong, 1993.
- MONTGOMERY, D.C e RUNGER, G.C. **Gauge Capability e Designed Experiments. Part I: Basic Methods**. Quality Engineering, 1993a.
- MONTGOMERY, D.C e RUNGER, G.C **Gauge Capability e Designed Experiments. Part II: Basic Methods**. Quality Engineering, 1993b.
- MONTGOMERY, D. C.; RUGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers (3rd ed.)**. New York: John Wiley, 2003.

MONTI, S.; JEFFERSON, J.; MERMEL, L.; PARENTEAU, S.; KENYON, S.; CIFELLI, B. Use of failure mode and effect analysis (FMEA) to improve active surveillance for methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) at a university-affiliated medical center. **American Journal of Infection Control**, v.33, n.5, p.e158-e158. 2005

MOSS, T. R.; WOODHOUSE, J. Criticality analysis revisited. **Quality and Reliability Engineering International**, 15, 117–121, 1999.

MOYANO-FUENTES, J.; SACRISTÁN-DÍAZ, M. Learning on lean: a review of thinking e research. **International Journal of Operations Production Management**, 32 (5), 551 e 582, 2012.

MURPHY, S. A. **LEVERaging Measurement System Analysis (MSA) to Improve Library Assessment: The Attribute Gage R&R**. *College & Research Libraries*, v. 70, p. 568–577, 2009.

NEPAL, B. P.; YADAV, O. P.; MONPLAISIR, L.; MURAT, A. A framework for capturing and analyzing the failures due to system/component interactions. **Quality and Reliability Engineering International**, 24, 265–289, 2008.

O’CONNOR, P. D. T. **Practical reliability engineering**. London, 2000.

PALADY, P. **FMEA: Análise dos Modos de Falha e Efeitos. Prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram**. São Paulo: IMAN, 1997.

PAN, J. N.; LI, C. I.; OU, S. C. Determining the optimal allocation of parameters for multivariate measurement system analysis. **Expert Systems with Applications**, n. May, 2015.

PELA´EZ, C. E., & BOWLES, J. B. Using fuzzy cognitive maps as a system model for failure modes and effects analysis. **Information Sciences**, 88, 177–199, 1996.

PENTTI, H.; ATTE, H. **Failure Mode and Effects Analysis of Software-Based Automation Systems**. Editora: STUK, Finland, 37 p., 2002.

PERUCHI, R. S. **Método Dos Componentes Principais Ponderados Aplicado Em Avaliação De Sistemas De Medição Com Grandezas Correlacionadas**. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UNIFEI, Itajubá/MG, 2011.

PERUCHI, R. S.; BALESTRASSI, P. P.; PAIVA, A. P.; FERREIRA, J. R.; SANTANA, C. M. A new multivariate gage R&R method for correlated characteristics. **International Journal of Production Economics**, v. 144, n. 1, p. 301–315, 2013.

PERUCHI, R. S.; Paiva, a. P.; Balestrassi, P. P.; Ferreira, J. R.; Sawhney, R. Weighted approach for multivariate analysis of variance in measurement system analysis. **Precision Engineering**, v. 38, p. 651–658, 2014.

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

PLAZA,I, UBÉ, M., MEDRANO, C., BLESÁ, A. “Application of the Philosophy of Quality in the Digital Electronic Matter”, **International Conference on Engineering Education**, July 21–25, 2003. Valencia, Spain, 2003.

- PRICE, C.J.; PUGH, D.R.; WILSON, M.S.; SNOOKE, N. The Flame system: automating electrical failure mode and effects analysis (FMEA). **International Reliability And Maintainability Symposium**, 1995.
- PUENTE, J.; PINO, R.; PRIORE, P.; DE LA FUENTE, D. A decision support system for applying failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 19, 137–150, 2002.
- RHEE, S. J.; ISHII, K.. Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability. **Advanced Engineering Informatics**, 17, 179–188, 2003.
- ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F.A.; AMARAL, D.C.; TOLEDO, J.C.; SILVA, S.L.; ALLIPRANDINI, D.H.; SCALICE, R.K. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo**. Editora Atlas, 2006.
- SANKAR N. R; PRABHU B. S. Modified approach for prioritization of failures in a system failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 2001.
- SANT'ANNA, A. P.; JUNIOR, R. P. **Composição probabilística no cálculo das prioridades na FMEA**. v. 5, n. 3, p. 179–191, 2010.
- SANT'ANNA, A. P. Probabilistic priority numbers for failure modes and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 2012.
- SCIPIONI, A.; SACCAROLA, G.; CENTAZZO, A.; ARENA, F. FMEA methodology design, implementation and integration with HACCP system in a food company. **Food Control**, v.13, n.8, p.495-501. 2002.
- SCOTT, B.S.; WILCOCK, A.E.; KANETKAR, V. A survey of structured continuous improvement programs in the Canadian food sector. **Food Control**, v.20, n.3, p.209- 217. 2009.
- SELLAPPAN, N.; OMAN, S.; PALANIKUMAR, K. **Modified Prioritization Methodology for Risk Priority Number in Failure Mode and Effects Analysis**. v. 3, n. 4, p. 27–36, 2013.
- SHAHIN, A. Integration of FMEA and the Kano model: An exploratory examination. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 21, 731–746, 2004.
- SHARMA, R. K.; KUMAR, D.; KUMAR, P. Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 22, 986–1004, 2005.
- SHARMA, R. K.; KUMAR, D.; KUMAR, P. Behaviour analysis and resource optimisation for an industrial system. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, 2, 413–443, 2007a.
- SHARMA, R. K.; KUMAR, D.; KUMAR, P. FM–A pragmatic tool to model, analyse and predict complex behaviour of industrial systems. **Engineering Computations**, 24, 319–346, 2007b.
- SHARMA, R. K., KUMAR, D., & KUMAR, P. Modeling and analysing system failure behaviour using RCA, FMEA and NHPPP models. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 24, 525–546, 2007c.

- SHARMA, R. K.; KUMAR, D.; KUMAR, P. Modeling system behavior for risk and reliability analysis using KBARM. **Quality and Reliability Engineering International**, 23, 973–998, 2007d.
- SHARMA, R. K.; KUMAR, D.; KUMAR, P. Application of fuzzy methodology to build process reliability: A practical case. **International Journal of Product Development**, 5, 125–152, 2008a.
- SHARMA, R. K.; KUMAR, D.; KUMAR, P. Fuzzy modeling of system behavior for risk and reliability analysis. *International Journal of Systems Science*, 39, 563–581, 2008b.
- SHARMA, R. K., KUMAR, D., & KUMAR, P. Predicting uncertain behavior of industrial system using FM—A practical case. **Applied Soft Computing**, 8, 96–109, 2008c.
- SHARMA, R. K.; SHARMA, P. System failure behavior and maintenance decision making using, RCA, FMEA and FM. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 16, 64–88, 2010.
- SHARMA, R., & SHARMA, P. Integrated framework to optimize RAM and cost decisions in a process plant. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2012.
- SIEGEL, S. **Nonparametric statistics for the Behavioral Sciences**. p. 312, 1956.
- SIEGEL, S.; CASTELLAN N. **Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences**. New York: McGraw-Hill, 1988.
- SPATH, P.L. **Using failure mode and effects analysis to improve patient safety**. AORN, v.78, n.1, p.15-37. 2003.
- STAMATIS, D. H. **Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution**. New York: ASQC, 1995.
- STENBECK, C; SVENSSON, J. **Value balancing method for product development: a case study at Volvo Car Corporation**. Tese (Doutorado) - Business Administration, School of Economic and Commercial Law, Gotemburg University, 2004.
- STONE, R.; TUMER, I.; STOCK, M. Linking product functionality to historic failures to improve failure analysis in design. **Research in Engineering Design**, 2005
- SUZUKI, T.; TSUTSUMI, Y.; KAWAMURA, H. Viewpoints to characterize precision evaluation methods in binary measurements. **Measurement**, v. 46, p. 3710–3714, 2013.
- TAN, C. M. Customer-focused build-in reliability: A case study. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 20, 378–397, 2003.
- TARGINO, M. das G.; GARCIA, J. C. R. Ciência brasileira na base de dados do Institute for Scientific Information (ISI). **Ciência da Informação**, Brasília, v. 29, n. 1, p. 103-117, 2000.
- TIAN, ZHANG-PENG; WANG, JIAN-QIANG ; ZHANG, HONG-YU An integrated approach for failure mode and effects analysis based on fuzzy best-worst, relative entropy, and VIKOR methods. **Applied Soft Computing**, 2018.
- TAY, K. M.; LIM, C. P. Fuzzy FMEA with a guided rules reduction system for prioritization of failures. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 23, 1047–1066, 2006a.

TAY, K. M.; LIM, C. P. Application of fuzzy inference techniques to FMEA. In A. Abraham, B. de Baets, M. Köppen, & B. Nickolay (Eds.), **Applied soft computing technologies: The challenge of complexity**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006b.

TAY, K. M.; LIM, C. P. Enhancing the failure mode and effect analysis methodology with fuzzy inference techniques. **Journal of Intelligent & Fuzzy Systems**, 21, 135–146, 2010.

THIVEL, P.X.; BULTEL, Y.; DELPECH, F. Risk analysis of a biomass combustion process using MOSAR and FMEA methods. **Journal of Hazardous Materials**, v.151, n.1, p.221-231. 2008.

TSAROUHAS, P.H.; ARVANITTOYANNIS, I.S.; AMPATZIS, Z.D. A case study of investigating reliability and maintainability in a Greek juice bottling medium size enterprise (MSE). **Journal of Food Engineering**, v.95, n.3, p.479-488. 2009.

TUMER, I.Y.; STONE, R.; BELL, D. Requirements for a failure mode taxonomy for use in conceptual design. In: **International Conference On Engineering Design**, 2003, Stockholm. Proceedings... Stockholm, 2003

VON AHSEN, A. Cost-oriented failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 25, 466–476, 2008.

WANG, J. J., JING, Y. Y., ZHANG, C. F., & ZHAO, J. H. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 13, 2263–2278, 2009a.

WANG, J., RUXTON, T., & LABRIE, C. R. Design for safety of engineering systems with multiple failure state variables. **Reliability Engineering & System Safety**, 50, 271–284, 1995.

WANG, J. J.; JING, Y. Y.; ZHANG, C. F.; ZHAO, J. H. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 13, 2263–2278, 2009a.

WANG, Y. M.; CHIN, K. S.; POON, G. K. K.; YANG, J. B. Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. **Expert Systems with Applications**, 36, 1195–1207, 2009b.

WATSON, P. F.; PETRIE, A. Method agreement analysis: a review of correct methodology. **Theriogenology**, v. 73, n. 9, p. 1167–79, jun. 2010.

XIAO, N. C.; HUANG, H. Z.; LI, Y. F.; HE, L. P.; JIN, T. D. Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA. **Engineering Failure Analysis**, 18, 1162–1170, 2011.

XIAO, N.; Huang, H-Z.; LI Y.; HE, L.; JIN, T. Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA. **Engineering Failure Analysis**, v. 18, n. 4, p. 1162–1170, 2011.

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

XU, Z. S.; DA, Q. L. An overview of operators for aggregating information. **International Journal of Intelligent Systems**, 18, 953–969, 2003.

YANG, J.; HUANG, H. Z.; HE, L. P.; ZHU, S. P.; WEN, D. Risk evaluation in failure mode and effects analysis of aircraft turbine rotor blades using Dempster– Shafer evidence theory under uncertainty. **Engineering Failure Analysis**, 18, 2084–2092, 2011.

YANG, J.; CHINCHILLI, V. M. Fixed-effects modeling of Cohen’s weighted kappa for bivariate multinomial data. **Computational Statistics and Data Analysis**, v. 55, n. 2, p. 1061–1070, 2011.

YANG, Z.; BONSALE, S.; Wang, J. Fuzzy rule-based Bayesian reasoning approach for prioritization of failures in FMEA. **IEEE Transactions on Reliability**, 57, 517–528, 2008.

YUE, S.; PILON, P.; CAVADIAS, G. Power of the Mann-Kendall and Spearman’s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. **Journal of Hydrology**, v. 259, n. 1-4, p. 254–271, 2002.

ZADEH, L.A. From computing with numbers to computing with words – from manipulation of measurements to manipulation of perceptions, **IEEE Transactions on Circuit Systems** 45, 1999.

ZAFIROPOULOS, E. P.; DIALYNAS, E. N. Reliability prediction and failure mode effects and criticality analysis (FMECA) of electronic devices using fuzzy logic. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 2005.

ZAMMORI, F.; GABBRIELLI, R. ANP/RPN: A multi criteria evaluation of the risk priority number. **Quality and Reliability Engineering International**, 2011.

ZHANG, Z. F., & CHU, X. N. Risk prioritization in failure mode and effects analysis under uncertainty. **Expert Systems with Applications**, 2011.

CHANAMOOL, NALINEE.; NAENNA, THANAKORN. Fuzzy FMEA application to improve decision-making process in an emergency department. **Applied Soft Computing**, 2016.

ANEXO A – FMEA Experimental (Caso 3)

PROCESSO	MÓDULO DE FALHA	EFEITO	S	CAUSA e MECANISMOS DE POTENCIAL FALHAS	O	CONTROLES ATUAIS DO PROCESSO DE PREVENÇÃO	CONTROLES ATUAIS DO PROCESSO DE DETECÇÃO	D	RPN
METALIZAÇÃO PLASMA Aplicar pó de molibdênio na face de contato do anel.	1 - Diâmetro da árvore antes de metalizar maior	Essatura da camada menor	5	Ferramental maior que o especificado e/ou danificado		Controle de Ferramental	FORM-AM-CP-401 Verificar extremidade da árvore na liberação e a cada dez árvores (Para anéis Fully-Faced plotar (MICRÔMETRO))		
	2 - Dureza / microdureza maior (Item verificado após operação Retífica Cilíndrica)	Desgaste elevado do conjunto anel/cilindro		Tensão / Voltagem abaixo do especificado		Manutenção preventiva	FORM-AM-CP-401 Para dureza, verificar um anel na liberação e a cada dez árvores; Para micro dureza, verificar um (MICRO-DURÔMETRO)		
	3-Má aderência (Item verificado após operação Retífica Cilíndrica)	Empipamento do motor		Penetra de classificação do óxido de alumínio do sistema de jateamento furado /ausente			FORM-AM-CP-401 Verificar um anel na liberação da máquina e a cada dez árvores (Para anéis Fully-Faced somente) (DISPOSITIVO PARA TESTE DE ADERÊNCIA)		
	4-Centragem da árvore de anéis fora do especificado antes de metalizar	Varição da espessura da camada ao longo do perímetro do anel		Desgaste nas faces laterais de contato dos colares		Controle de Ferramental	FORM-AM-CP-401 Verificar 100% das árvores, registrar na liberação e a cada dez árvores (RELÓGIO COMPARADOR)		
	5-Espessura do Bond Coating acima do especificado	Camada metalizada menor do que a especificação		Vazão do pó de molibdênio acima do especificado			FORM-AM-CP-401 Verificar um anel na liberação da máquina e a cada dez árvores (EMBUTIMENTO E MICROSCÓPIO)		

ANEXO B – FMEA R&R

FMEA R&R					
Nome:		Data:		Tema:	
#	() Processo () Projeto () Sistema () Produto	Modo de Falha	Ação	Quem	Quando
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					

ANEXO C – FMEA R&R

Nome: TMI		Data: 10/07/2018		Tema: PROCESSO DE EXPEDIÇÃO			
#	(X) Processo () Projeto () Sistema () Produto	Modo de Falha	Causa	Efeito	Severidade	Avaliação	
						Ocorrência	Deteção
1	Recebimento da Produção Halb	Recebimento incorreto	Operador efetua manualmente o recebimento	Inversão de SKU, quantidade e lote no recebimento			
2	Armazenagem de AMPE	Armazenagem invertida	Falha de atenção e falha de equipamento que gera necessidade de digitação	Inversão de estoque			
3	Alteração de status pela Qualidade CLIENTE	Alteração do status do produto incorreto	Falha de digitação	Liberação de produto incorreto (exemplo: bloqueado)			
4	Expedição AMPE	Transferência MA01 para PR02 (transação MB1B)	Esquecer de fazer a movimentação no SAP	Cliente vê saldo contábil que na realidade não existe			
5	Retorno de material penetrado	Não mudar o status de 19 (bloqueado por qualidade interno) para 20	Falha na interface. Inserir quantidade de espaço incorreto no campo de caracteres	Deixar de atender a fábrica, mesmo tendo o produto no estoque			
6	Requisição de material para a linha de produção	Entrega de material incorreta	Falha de parametrização do processo de recebimento do DLx	Produto errado			
7	Consumo do material no PH	Consumir fisicamente (CLIENTE) e não dar baixa no sistema (PROVEDOR)	Falha de atenção ou treinamento	Parada de linha			
8	Mudança no programa	Deixar de abastecer ou abastecer produto incorreto	Falha de comunicação com antecedência	Parada de linha ou produção com insumo incorreto			
9	Sistema DLx	Não poder usar o DLx	Parada no sistema	Parada de linha			
10	Recebimento de produto acabado	Recebimento de pallet invertido	Scanea uma linha de produção e fisicamente retira da outra linha	Expedição de material invertido			
11	Armazenagem de PA	Armazenagem invertida	Falha de atenção e falha de equipamento que gera necessidade de digitação	Inversão de estoque			
12	Alteração de status pela Qualidade Interno	Alteração do status do produto incorreto	Falha de digitação	Liberação de produto incorreto (exemplo: bloqueado)			
13	Sistema VBA	Sem alternativa para input de informação	Parada no sistema	Parada de linha			
14	Ajuste na programação	Ociosidade de esteiras	Falha de comunicação com antecedência	Parada de linha ou produção com produto			
15	Falha de material no PHI	Sem baixa de consumo no sistema	Parada no sistema	Parada de linha			
16	Retorno de material do cliente	Bloqueado por qualidade interno	Falha na interface	Parada de linha			
17	Sistema SAP	Anotação manual	Erro de digitação	Liberação de produto incorreto (exemplo: bloqueado)			
18	Abastecimento de combustível	Explosão	Armazenamento no local errado	Risco de incêndio			
19	Troca de bateria da palletizadora	Explosão	Falha de planejamento nas recargas de bateria	Risco de incêndio			
20	Carregamento de caminhão	Trava porta do caminhão incorreta	Trava porta do caminhão não funcionar	Parada de linha			
21	Expedição	Expedição de material invertido	Recebimento de pallet invertido	Expedição incorreta			

FMEA R&R

ANEXO D – FMEA R&R

FMEA R&R					
Nome: TM1, TM2, TM3, TM4 e TM5			Data: 10/07/2018	Tema: PROCESSO DE EXPEDIÇÃO	
#	(X) Processo () Projeto () Sistema () Produto	Modo de Falha	Ação	Quem	Quando
1	Recebimento da Produção Halb	Recebimento incorreto	- Emissão de etiquetas inteligentes - Configuração dos locais de armazenamento	PMO	EOM
2	Armazenagem de AMPE	Armazenagem invertida	- Reciclagem - Troca/Aluguel de equipamento (scanner) para não ter que digitar	PMO	EOM
3	Alteração de status pela Qualidade CLIENTE	Alteração do status do produto incorreto	Disponibilizar computador com DLx para CLIENTE	PMO	EOM
4	Expedição AMPE	Transferência MA01 para PR02 (transação MB1B)	Treinamento de reciclagem para a operação	PMO	EOM
5	Retorno de material peneirado	Não mudar o status de 19 (bloqueado por qualidade interno) para 20	Tratativa de erro na tela de digitação (IT)	PMO	EOM
6	Requisição de material para a linha de produção	Entrega de material incorreta	- Provisório: receber lista de produtos da CLIENTE em papel - Definitivo: configuração da área Buffer (DLx) e receber do planejamento SAP (via interface)	PMO	EOM
7	Consumo do material no PH	Consumir fisicamente (CLIENTE) e não dar baixa no sistema (PROVEDOR)	Idem ao item 6	PMO	EOM
8	Mudança no programa	Deixar de abastecer ou abastecer produto incorreto	Idem ao item 6	PMO	EOM
9	Sistema DLx	Não poder usar o DLx	- Elaborar um plano de contingência - Analisar contrato e propor segundo link (backup) para queda de link (projeto DRP - Disaster Recovery Plan)	PMO	EOM
10	Recebimento de produto acabado	Recebimento de pallet invertido	- I replicará email de III para II sobre cotação de etiqueta inteligente - II fará análise para análise	PMO	EOM
11	Armazenagem de PA	Armazenagem invertida	- I passará as posições para II - II fará a limpeza do sistema que permitirá a não digitação	PMO	EOM
12	Alteração de status pela Qualidade interno	Alteração do status do produto incorreto	- I replicará email de III para II sobre cotação de etiqueta inteligente - II fará análise para análise	PMO	EOM
13	Sistema VBA	Sem alternativa para input de informação	Idem ao item 12	PMO	EOM
14	Ajuste na programação	Ociosidade de esteiras	Tratativa de erro na tela de digitação (IT)	PMO	EOM
15	Falta de material no PHI	Sem baixa de consumo no sistema	- Elaborar um plano de contingência - Analisar contrato e propor segundo link (backup) para queda de link (projeto DRP - Disaster Recovery Plan)	PMO	EOM
16	Retorno de material do cliente	Bloqueado por qualidade interno	Disponibilizar computador com DLx para CLIENTE	PMO	EOM
17	Sistema SAP	Anotação manual	Treinamento de reciclagem para a operação	PMO	EOM
18	Abastecimento de combustível	Explosão	Tratativa de erro na tela de digitação (IT)	PMO	EOM
19	Troca de bateria da paletizadora	Explosão	- Provisório: receber lista de produtos da CLIENTE em papel - Definitivo: configuração da área Buffer (DLx) e receber do planejamento SAP (via interface)	PMO	EOM
20	Carregamento de caminhão	Trava porta do caminhão incorreta	Idem ao item 15	PMO	EOM
21	Expedição	Expedição de material invertido	Idem ao item 15	PMO	EOM