

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

**ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA DO FMEA: UMA ABORDAGEM  
QUANTITATIVA À UMA FERRAMENTA QUALITATIVA**

**DIOGO NUNES DALOSTO**

**Itajubá, julho de 2015**

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

**DIOGO NUNES DALOSTO**

**ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA DO FMEA: UMA ABORDAGEM  
QUANTITATIVA À UMA FERRAMENTA QUALITATIVA**

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

**Área de Concentração:** Qualidade e Produto

**Orientador:** Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi  
**Co-orientador:** Prof. Dr. Rogério Santana Peruchi

**Itajubá, julho de 2015**

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

**DIOGO NUNES DALOSTO**

**ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA DO FMEA: UMA ABORDAGEM  
QUANTITATIVA À UMA FERRAMENTA QUALITATIVA**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 16 de julho de 2015, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção.**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi (Orientador)

Prof. Dr. Rogério Santana Peruchi (Co-orientador)

Prof. Dr. Paulo Henrique da Silva Campos

Prof. Dr. Ronã Rinston Amaury Mendes

**Orientador:** Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi

**Co-orientador:** Prof. Dr. Rogério Santana Peruchi

Itajubá  
2015

*Dedico este trabalho...*

*A toda a minha família que sempre me apoiou nas minhas vitórias, derrotas e principalmente nos momentos de fraqueza. Dedico também ao ser mais especial, minha inspiração e motivação, meu filho Miguel Matiusso Dalosto..*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por ter uma vida e ter capacidade para correr atrás dos meus objetivos. Agradeço a Ele por não nos dar tudo o que pedimos. Agradeço em especial por todas as oportunidades que tive, pelo caminho que trilhei até chegar aqui, por todas as pessoas que colocou em meu caminho. Por todos os sacrifícios e momentos de dificuldades que Ele permitiu que eu superasse para meu crescimento e amadurecimento.

Agradeço de maneira especial aos meus pais, por serem pessoas exemplares para mim e meus os meus irmãos e sempre nos guiar para o caminho do bem, da honestidade e família. Principalmente, por serem compreensivos com as minhas decisões e acreditarem no meu caminho que é difícil, mas que a recompensa um dia virá.

Agradeço aos meus irmãos que foram sempre parceiros, que mesmo sem saber, me guiavam de alguma maneira e incentivavam a sempre seguir em frente na minha jornada.

Agradeço a Andressa por me apoiar e estar ao meu lado há muitos anos, por ser compreensiva em todas as decisões e escolhas da minha vida e, sobretudo, por cuidar do nosso maior tesouro: o Miguel.

Agradeço ao grande mestre Pedro Paulo por acreditar em mim e ser uma pessoa inspiradora dentro e fora do mundo acadêmico, sempre com muita humildade e motivando os trabalhos. Agradeço também ao Doctor Rogério por ser meu co-orientador e ter me apresentado o mundo acadêmico e hoje, ser um grande exemplo para a minha vida.

Por fim, agradeço aos amigos do GEPE de Qualidade, a todos os amigos e parceiros da turma de Mestrado/Doutorado 2014, a galera do futebol, aos integrantes da minha república e a todos os professores do IEPG.

*“Confia teus negócios ao Senhor e teus planos terão bom êxito.”*

Provérbios 16, 3

*“Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo está vendo  
e pensar uma coisa diferente” (Roger Von Oech).*

# RESUMO

Atualmente é fundamental para as organizações classificar e priorizar seus projetos com relação aos níveis de risco, para focarem nos que necessitam de mais atenção e não comprometerem o desempenho dos negócios e principalmente a segurança dos projetos e funcionários. Para tanto, tem-se o FMEA (Análise dos Modos e Efeitos de Falha), que é a ferramenta mais utilizada nas indústrias para executar essa tarefa segundo diversos autores. O FMEA é uma ferramenta qualitativa que é desenvolvida por uma equipe de especialistas que atribuem notas para os modos de falha em termos da Severidade, Ocorrência e Detecção, onde o produto dessas notas formam o índice de prioridade de risco (RPN). Os projetos que apresentam os maiores valores de RPN devem ser priorizados. No entanto, durante esse processo de atribuição de notas ao FMEA, os avaliadores tendem a ser subjetivos. Sabendo da grande importância que tem o FMEA para as organizações como ferramenta para tomada de decisão e que depende diretamente da opinião dos especialistas que o desenvolvem, surgiu a motivação para o desenvolvimento dessa dissertação sob a perspectiva de estudar se o FMEA é uma ferramenta subjetiva. O estudo consistente em aplicar a Análise de Concordância por Atributos utilizando a análise por GR&R atributos junto ao FMEA, para verificar o nível de concordância entre os avaliadores quando o realizam. Por meio dos coeficientes de concordância de Fleiss' Kappa e de Kendall, buscou-se abordar a ferramenta qualitativa FMEA de uma maneira quantitativa e, assim, verificar as habilidades de Repetitividade e Reprodutividade dos especialistas enquanto desenvolvem o FMEA. Para que essa análise estatística fosse possível, a pesquisa foi dividida em dois casos: Caso 1, onde um FMEA experimental foi desenvolvido para que possibilitasse a análise de Repetitividade e Reprodutividade do FMEA; e o Caso 2, cujo é dividido em dois FMEA's que analisam os mesmos modos de falha, onde o primeiro é um FMEA tradicional e o outro um Fuzzy-FMEA, com o objetivo de analisar e comparar se a grande tendência nos últimos anos de se utilizar a lógica Fuzzy aliada ao FMEA traz benefícios com relação à concordância dos seus avaliadores. Como resultados dessa dissertação, podemos afirmar que a partir da análise do Caso 1, os especialistas não apresentaram concordância estatística significativa para a Repetitividade e Reprodutividade do FMEA, onde conclui-se que as avaliações dos especialistas são subjetivas. A partir da análise do Caso 2, pode-se concluir que, se comparado o desempenho dos especialistas, levando em consideração a análise de concordância, o FMEA tradicional apresenta melhores resultados que o sistema Fuzzy-FMEA, ou seja, o Fuzzy-FMEA não agrega benefícios ao FMEA tradicional.

**Palavras-Chave:** FMEA, Análise de Concordância, GR&R atributos, Fuzzy-FMEA, Subjetividade.

# ABSTRACT

Currently it is critical for organizations to classify and prioritize their projects with respect to risk levels to focus on that need more attention and will not compromise the performance of the business and especially the safety of projects and employees. So, we have the FMEA (Failure Modes and Effects Analysis), which is the most used tool in industries to perform this task according to various authors. The FMEA is a qualitative tool that is developed by a team of experts that attach notes to the failure modes in terms of Severity, Occurrence and Detection, where the product of these notes form the risk priority number (RPN). Projects that have the highest RPN values should be prioritized. However, during this process of assigning the FMEA notes, evaluators tend to be subjective. Knowing the great importance of the FMEA for organizations as a tool for decision making and that depends directly on the opinion of experts who develop, came up the motivation to develop this thesis from the perspective of studying the FMEA as subjective tool. The study consistent in applying the Agreement Analysis by attributes using the analysis by GR&R attributes into FMEA, to check the level of agreement among raters when performing it. Through Fleiss' Kappa and Kendall coefficients of concordance, intended to address the qualitative tool FMEA in a quantitative way and thus check the Repeatability and Reproducibility specialist's skills while developing FMEA. For this statistical analysis to be possible, the research was divided into two cases: Case 1, where an experimental FMEA was developed to make possible the analysis of Repeatability and Reproducibility of FMEA; and Case 2, which is divided into two FMEA's analyzing the same failure modes, where the first is a traditional FMEA and the other a Fuzzy-FMEA, in order to analyze and compare the major trend in recent years to use the Fuzzy logic combined with FMEA, brings benefits related to the agreement of the evaluators. As a result of this dissertation, we can say that from the Case 1 analysis, the experts showed no statistically significant agreement for Repeatability and Reproducibility of FMEA, where it is concluded that the evaluations of expert are subjective. From the analysis of Case 2, it can be concluded that compared the performance of an expert, taking into consideration the correlation analysis, the traditional FMEA shows better results than the Fuzzy FMEA system, so, the Fuzzy-FMEA does not add benefits to the traditional FMEA.

**Keywords:** FMEA, Agreement Analysis, GR&R attributes, Fuzzy-FMEA, Subjectivity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Número de publicações por ano sobre FMEA .....	18
Figura 1-2 Número de publicações por ano sobre Análise de Concordância.....	19
Figura 1-3 Número de publicações por ano sobre FMEA e Análise de Concordância .....	20
Figura 2-1 Custo de modificações durante um projeto.....	24
Figura 2-2 Melhoria da qualidade dos processos ao longo dos anos .....	25
Figura 2-3 Estrutura do FMEA.....	34
Figura 2-4 Ilustração do time FMEA - composto por colaboradores da área de Projeto, Planejamento da produção, Produção, Vendas, Suprimentos, Qualidade, Teste e Manufatura.....	35
Figura 2-5 Formulário FMEA genérico.....	37
Figura 2-6 Visão estrutural das informações do FMEA.....	38
Figura 2-7 Ilustração da exatidão, tendência e precisão .....	53
Figura 3-1 Classificação da pesquisa científica.....	74
Figura 3-2 Fluxograma da análise estatística do FMEA .....	77
Figura 4-1 Gráfico de pontuações para a Severidade .....	86
Figura 4-2 Nível de concordância entre avaliador para a Severidade .....	87
Figura 4-3 Gráfico de atribuição das notas para Ocorrência .....	92
Figura 4-4 Nível de concordância entre avaliador para Ocorrência .....	93
Figura 4-5 Gráfico de atribuição das notas para Detecção .....	97
Figura 4-6 Nível de concordância entre avaliador para Detecção .....	98
Figura 4-7 Gráfico do produto RPN .....	103
Figura 4-8 Nível de concordância entre avaliador para RPN ( <i>Within</i> ).....	104
Figura 4-9 Etapas de análise do sistema Fuzzy – FMEA .....	122

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2-1 Relevância do tipo de FMEA .....	33
Quadro 2-2 Etapas de elaboração do Formulário FMEA .....	36
Quadro 2-3 Desenvolvimento do FMEA.....	40
Quadro 2-4 As principais deficiências do FMEA – Parte I.....	43
Quadro 2-5 As principais deficiências do FMEA - Parte II .....	44
Quadro 2-6 As principais deficiências do FMEA - Parte III .....	45
Quadro 2-7 Objetivos da Análise de Concordância .....	57
Quadro 2-8 Critérios para a análise GR&R por atributos.....	59
Quadro 2-9 Objetivos da Análise GR&R por atributos.....	60
Quadro 2-10 Teste de hipóteses ( <i>Fleiss'Kappa</i> ) .....	64
Quadro 2-11 Teste de hipóteses ( <i>W de Kendall</i> ) .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 Classificação do índice de Fleiss' Kappa .....	79
Tabela 4-2 Faixas de aceitabilidade do índice de Kendall .....	81
Tabela 4-3 FMEA Experimental 1 .....	83
Tabela 4-4 FMEA Experimental 2 .....	84
Tabela 4-5 FMEA Experimental 3 .....	84
Tabela 4-6 Análise de concordância para a Severidade ( <i>Within</i> ) .....	86
Tabela 4-7 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Severidade ( <i>Within</i> ).....	88
Tabela 4-8 Coeficiente de Kendall para a Severidade ( <i>Within</i> ).....	89
Tabela 4-9 Análise de Concordância para a Severidade ( <i>Between</i> ) .....	90
Tabela 4-10 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Severidade ( <i>Between</i> ).....	90
Tabela 4-11 Coeficiente de Kendall para a Severidade ( <i>Between</i> ).....	90
Tabela 4-12 Análise de concordância para a Ocorrência ( <i>Within</i> ) .....	92
Tabela 4-13 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Ocorrência ( <i>Within</i> ).....	93
Tabela 4-14 Coeficiente de Kendall para a Ocorrência ( <i>Within</i> ).....	94
Tabela 4-15 Concordância observadores para a Ocorrência ( <i>Between</i> ) .....	95
Tabela 4-16 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Ocorrência ( <i>Between</i> ).....	95
Tabela 4-17 Coeficiente de Kendall para a Ocorrência ( <i>Between</i> ).....	96
Tabela 4-18 Análise de concordância para Detecção .....	97
Tabela 4-19 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Detecção ( <i>Within</i> ) .....	99
Tabela 4-20 Coeficiente de Kendall para Detecção ( <i>Within</i> ) .....	99
Tabela 4-21 Análise de Concordância para Detecção ( <i>Between</i> ).....	100
Tabela 4-22 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Detecção ( <i>Between</i> ) .....	101
Tabela 4-23 Coeficiente de Kendall para Detecção ( <i>Between</i> ) .....	101
Tabela 4-24 Análise de concordância para RPN ( <i>Within</i> ).....	103
Tabela 4-25 Coeficiente de Fleiss' Kappa para RPN ( <i>Within</i> ) .....	104
Tabela 4-26 Coeficiente de Kendall para RPN ( <i>Within</i> ) .....	104
Tabela 4-27 Análise de Concordância para RPN ( <i>Between</i> ) .....	105
Tabela 4-28 Coeficiente de Fleiss' Kappa para RPN ( <i>Between</i> ).....	105
Tabela 4-29 Coeficiente de Kendall para RPN ( <i>Between</i> ) .....	106

Tabela 4-30 RPN do FMEA Tradicional.....	110
Tabela 4-31 Atributos de classificação para o FMEA tradicional.....	112
Tabela 4-32 Tabela de atributo de classificação Fuzzy – FMEA.....	113
Tabela 4-33 Análise de Concordância para Severidade .....	114
Tabela 4-34 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Severidade.....	114
Tabela 4-35 Coeficiente de Kendall para Severidade.....	115
Tabela 4-36 Análise de Concordância para Ocorrência .....	115
Tabela 4-37 Coeficiente de Fleiss' Kappa para Ocorrência.....	115
Tabela 4-38 Coeficiente de Kendall para Ocorrência.....	116
Tabela 4-39 Análise de Concordância para a Detecção .....	116
Tabela 4-40 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Detecção .....	116
Tabela 4-41 Coeficiente de Kendall para a Detecção.....	117
Tabela 4-42 Análise de Concordância para o RPN .....	117
Tabela 4-43 Coeficiente de Fleiss' Kappa para o RPN.....	118
Tabela 4-44 Coeficiente de Kendall para o RPN.....	118
Tabela 4-45 Análise de Concordância para todas observações .....	119
Tabela 4-46 Coeficiente de Fleiss' Kappa para todas as observações .....	119
Tabela 4-47 Coeficiente de Kendall para todos componentes Caso 2.....	120
Tabela 4-48 Tabela de RPN-Fuzzy trapezoidal (parte 1) .....	123
Tabela 4-49 Tabela de RPN-Fuzzy trapezoidal (parte 2) .....	123
Tabela 4-50 Tabela RPN defuzzificado.....	124
Tabela 4-51 Análise de Concordância .....	125
Tabela 4-52 Coeficiente de Fleiss' Kappa para o Fuzzy-FMEA .....	125
Tabela 4-53 Coeficiente de Kendall para o Fuzzy-FMEA .....	126

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

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

# SUMÁRIO

1. <b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1 Justificativa.....	18
1.2 O problema de pesquisa.....	20
1.3 Objetivos.....	21
1.3.1 Objetivo Geral .....	21
1.3.2 Objetivos específicos .....	21
1.4 Estrutura da dissertação .....	22
2. <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	23
2.1 Considerações iniciais .....	23
2.2 Análise de falhas potenciais .....	23
2.3 Métodos de análise de falhas potenciais.....	24
2.4 FMEA – Análise dos Modos e Efeitos de Falha .....	26
2.4.1 Definição .....	26
2.4.2 O que é o FMEA.....	26
2.4.3 Histórico do FMEA .....	28
2.4.4 Objetivos do FMEA .....	30
2.4.5 Tipos de FMEA .....	32
2.4.6 Estrutura do FMEA .....	33
2.4.7 Elaboração do FMEA.....	34
2.4.7.1 Equipes de avaliadores do FMEA.....	34
2.4.7.2 Formulário FMEA.....	36
2.4.7.3 Índices de Risco .....	38
2.4.7.3.1 RPN – Número de Prioridade de Risco .....	39
2.4.8 Desenvolvimento do FMEA.....	39
2.4.9 Aplicações do FMEA .....	41
2.4.10 Análise crítica sobre o FMEA .....	42

2.4.11	Subjetividade do FMEA .....	45
2.4.11.1	Pesquisas relacionadas à subjetividade do FMEA .....	47
2.5	Análise do sistema de medição – MSA .....	48
2.5.1	Definições da MSA .....	49
2.5.2	Objetivos da MSA .....	50
2.5.3	Estudo GR&R.....	50
2.5.4	Cálculos e formulações.....	51
2.5.4.1	Dados do tipo contínuos.....	51
2.5.5	Variabilidade do sistema .....	52
2.5.5.1	Fonte de variação .....	54
2.6	Análise de Concordância .....	54
2.6.1	Dados do tipo atributos.....	55
2.6.1.1	Tipos de dados atributos.....	56
2.6.2	Objetivos da análise de concordância.....	57
2.6.3	GR&R por atributos .....	58
2.6.3.1	Objetivos da GR&R por atributos.....	59
2.6.4	Indicadores de Análise de Concordância.....	60
2.6.5	Escolha dos coeficientes de concordância desta pesquisa.....	61
2.6.5.1	Coefficiente de concordância de Fleiss' Kappa .....	62
2.6.5.1.1	Cálculos do coeficiente de Fleiss' Kappa.....	63
2.6.5.1.2	Interpretação de Fleiss' Kappa .....	64
2.6.5.2	Coefficiente de concordância de Kendall.....	65
2.6.5.2.1	O coeficiente de correlação Tau ( $\tau$ ) de Kendall.....	66
2.6.5.2.2	Coefficiente de concordância W de Kendall.....	67
2.6.5.2.3	Cálculos e formulações para W de Kendall.....	67
2.6.5.2.4	Interpretação do coeficiente de concordância de Kendall .....	69

2.6.5.3	Porcentagem de concordância.....	70
2.7	Considerações finais.....	71
3.	<b>MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	73
3.1	Considerações iniciais .....	73
3.2	Classificação da pesquisa científica .....	73
3.3	Definição do método de pesquisa experimental.....	74
3.4	Análise estatística .....	75
3.4.1	Justificativa da escolha dos índices estatísticos para a análise do FMEA.....	75
3.4.2	Desenvolvimento da análise estatística .....	76
3.5	Desenvolvimento da análise da pesquisa.....	77
3.6	Considerações finais.....	78
4.	<b>APLICAÇÃO DE ANÁLISE DE CONCORDÂNCIA AO FMEA</b> .....	79
4.1	Classificação do FMEA.....	79
4.1.1	Matriz de classificação Fleiss' Kappa .....	79
4.1.2	Desenvolvimento da classificação por Kendall.....	80
4.1.3	Matriz de classificação Kendall.....	81
4.2	CASO 1- Estudo experimental .....	82
4.2.1	Desenvolvimento do FMEA.....	82
4.2.2	Coleta dos dados do experimento.....	83
4.2.3	Análise dos dados .....	85
4.2.3.1	Severidade.....	85
4.2.3.1.1	Análise de Concordância entre observador ( <i>Within</i> ) .....	85
4.2.3.1.2	Análise de Concordância dentre os observadores ( <i>Between</i> ) .....	90
4.2.3.2	Ocorrência .....	91
4.2.3.2.1	Análise de Concordância entre observador ( <i>Within</i> ) .....	91
4.2.3.2.2	Análise de Concordância dentre os observadores ( <i>Between</i> ) .....	94
4.2.3.3	Detecção.....	96

4.2.3.3.1	Análise de Concordância entre observador ( <i>Within</i> ) .....	96
4.2.3.3.2	Análise de Concordância dentre os observadores ( <i>Between</i> ) .....	100
4.2.3.4	RPN – Número de Prioridade de Risco.....	101
4.2.3.4.1	Análise de Concordância entre observador ( <i>Within</i> ) .....	102
4.2.3.4.2	Análise de Concordância dentre os observadores ( <i>Between</i> ) .....	105
4.2.4	Conclusões do método Experimental .....	106
4.3	CASO 2 - Estudo dos dados da literatura.....	109
4.3.1	Descrição dos dados .....	109
4.3.2	FMEA tradicional.....	110
4.3.3	Fuzzy - FMEA .....	110
4.3.4	Desenvolvimento da análise .....	111
4.3.5	Análise dos Resultados: FMEA tradicional.....	114
4.3.5.1	Severidade .....	114
4.3.5.2	Ocorrência.....	115
4.3.5.3	Detecção.....	116
4.3.5.4	RPN.....	117
4.3.5.5	Análise de todas as avaliações .....	118
4.3.5.6	Conclusões do FMEA tradicional .....	120
4.3.6	Análise dos Resultados: Fuzzy - FMEA .....	121
4.3.6.1	Desenvolvimento da Análise.....	121
4.3.6.2	Análise de concordância aplicada ao Fuzzy-FMEA.....	124
4.3.6.3	Conclusões sobre o Fuzzy-FMEA .....	126
5.	<b>CONCLUSÕES</b> .....	128
5.1	Considerações finais .....	130
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	130
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	132
	<b>ANEXO A – FMEA Caso 1</b> .....	145

# 1. INTRODUÇÃO

Em um mundo cada vez mais competitivo as organizações necessitam projetar e desenvolver novos produtos (MOYANO-FUENTE, 2012), bem como evoluir com rápidas melhorias para se manterem competitivas e garantirem a qualidade do produto com baixo custo e reduzido tempo de produção para atenderem a demanda do mercado: este é o conceito de avaliação de risco (CHANG, 2009). O FMEA é uma das técnicas utilizadas para identificar e eliminar falhas conhecidas ou potenciais visando aumentar a confiabilidade e segurança dos sistemas complexos e destina-se a fornecer informações para a tomada de decisões de gestão do risco (LIU, LIU e LIU, 2013). Além disso, tem grande importância na indústria, pois é a ferramenta mais utilizada para selecionar e priorizar os riscos (STAMATIS, 1995; HAWKINS e WOOLLONS *et al.*, 1998; STONE *et al.*, 2005; ROZENFELD *et al.*, 2006).

O objetivo do FMEA é atribuir recursos limitados aos itens que apresentam maiores riscos à organização de maneira que se possa estabelecer uma ordem de prioridade de risco (FORD MOTOR COMPANY, 1988). Devido a sua eficiência, atualmente o FMEA é adotado em muitos lugares, tais como, as indústrias aeroespaciais, militares, automobilísticas, de energia elétrica, metalúrgicas, semicondutores, etc. (LIU, LIU e LIU, 2013).

Para se realizar o FMEA, os especialistas de uma instituição devem se organizar e formarem um equipe entre três e seis componentes. Essa equipe estabelece os possíveis riscos que possam afetar a empresa e seus interesses. Os riscos potenciais também podem ser identificados como modo de falha e são estabelecidos a níveis de processo, desenvolvimento de produto (PDP) e de sistema. A maioria dos métodos FMEA utiliza o valor do número de prioridade de risco (RPN) para avaliar o risco do processo em análise (LIU *et al.*, 2013). No método convencional, o RPN é o resultado do produto de três parâmetros que são questionados: a gravidade da falha (S), a probabilidade de falha (O), e a probabilidade de não detectar a falha (D); ou seja,  $RPN = S \times O \times D$ . Esses três parâmetros, S, O e D, são avaliados através de uma escala ordinal de medida, que varia de 1 a 10, onde os avaliadores escolhidos atribuem notas a cada um dos modos de falha. Os modos de falha e as causas que têm as maiores pontuações RPN devem, então, serem priorizados através de ações de correção e melhoria (CHANG, 2009).

Sobre este processo de atribuição de notas ao FMEA diversos autores afirmam conter problemas das mais diversas naturezas. O problema de pesquisa dessa dissertação envolve esses

atributos do FMEA que são subjetivos e têm diferentes níveis de importância que ficam sujeitos a interpretação dos avaliadores durante o processo de atribuição de notas, como afirmam Braglia e Bevilacqua, 2000; Xu *et al.*, 2002; Braglia *et al.*, 2003a, 2003b; Garcia *et al.*, 2005; Sharma *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2009b; Chin *et al.*, 2009a, 2009b; Chen e Ko, 2009a, 2009b; Chang *et al.*, 2010a; Abdelgawad e Fayek, 2010; Gargama e Chaturvedi, 2011; Yang *et al.*, 2011; Zammori e Gabbrielli, 2011; Liu *et al.*, 2011, 2012; Kutlu e Ekmekçioğ Lu, 2012.

Com base nesse interesse de pesquisa, podemos nos questionar sobre os resultados alcançados com o FMEA a partir da sua abordagem qualitativa subjetiva, pois o ser humano possui por sua natureza julgamentos diferentes. No entanto, quando se trata de interesses comuns do tema de uma organização e que estão no domínio de especialistas que convivem e conhecem os seus problemas, confia-se que eles tenham bom senso para serem capazes de defender esses interesses comuns e direcionar a instituição para o caminho certo. Para tanto, busca-se compor times de profissionais para tomadas de decisões importantes que envolva riscos e, em equipes, espera-se que tenham os mesmos conceitos, ainda que a partir de pontos de vista diferentes e possam trabalhar com consistência e homogeneizar as decisões.

Ainda que os responsáveis por gerir setores, departamentos, empresas, processos, etc., tenham opiniões diferentes, espera-se que essa diferença seja consideravelmente pequena, a fim de não influenciar de maneira radical os resultados e prejudicar os valores da organização, a segurança dos funcionários e projetos, bem como a estratégia da empresa. Assim, seguindo essa linha natural de raciocínio, espera-se *a priori* que exista o consenso entre os especialistas que são os responsáveis por esses processos, em especial durante a condução do FMEA, tema desta pesquisa.

Com base nessas premissas, esta obra de dissertação tem o objetivo de investigar o FMEA aplicando os conceitos da Análise do Sistema de Medição (MSA) e sua análise de Repetitividade e Reprodutividade (GR&R) e proporcionar uma abordagem quantitativa à um sistema qualitativo e analisar a subjetividade presente nesta ferramenta tão importante que é o FMEA. Esse estudo foi conduzido a partir da análise de concordância dos avaliadores por meio dos coeficientes indicadores de Fleiss' Kappa e de Kendall.

## 1.1 Justificativa

Os conceitos da abordagem quantitativa sob a ferramenta qualitativa FMEA é inédito, bem como o desenvolvimento e a aplicação da análise de concordância. Apesar da grande importância do FMEA como ferramenta qualitativa de priorização do risco, não há nada na literatura que relate até o momento essas ideias, principalmente utilizando como base o artigo de revisão da literatura de Liu, Liu, e Liu de 2013, sobre o FMEA e suas tendências, cujo revisou mais de 75 obras de 1992 até o ano de 2012.

Aliado a este fato, outra justificativa da escolha deste tema é a realização de um estudo bibliométrico, a fim de identificar as publicações científicas existentes sobre o tema: FMEA e Análise de Concordância (*Agreement Analysis*). Utilizou-se como referência a base de dados ISI – Web of Science, na qual foram coletados dados entre os dias 19 e 30 de Maio de 2015.

Segundo os autores Targino e Garcia (2000), a base de dados *ISI* é uma boa ferramenta para o diagnóstico da produção científica, pois é considerada a maior base de dados de informações científicas. Para Junior, Miguel e Carvalho (2011), a base *ISI* está entre as bases internacionais multidisciplinares de maior prestígio e a sua utilização é justificada pela abrangência e facilidade de acesso para a maioria dos pesquisadores.

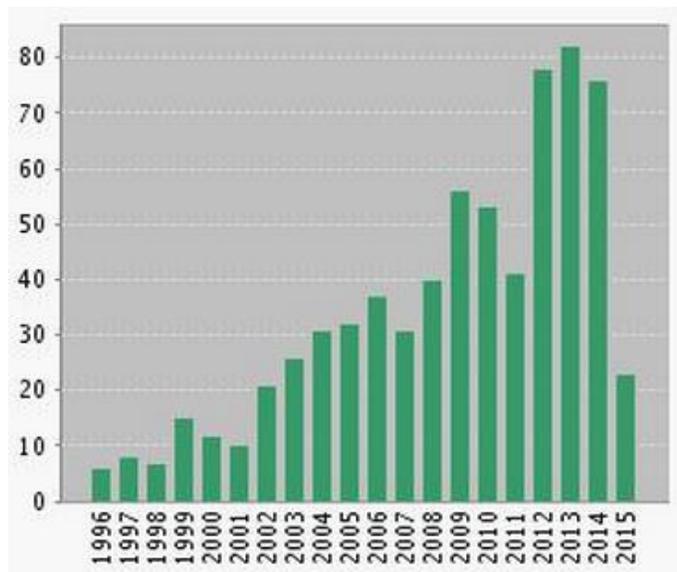


Figura 1-1 Número de publicações por ano sobre FMEA  
Fonte: adaptado de Web of Knowledge (2015)

A pesquisa bibliométrica buscou trabalhos relacionados ao tema de pesquisa utilizando as palavras-chave:

- FMEA (*Failure Mode e Effect Analysis*);
- “*Agreement Analysis*” (Análise de concordância).

A busca se concentrou em encontrar trabalhos nos últimos 20 anos e limitou-se o tipo de documento (*document type*) em somente artigos.

A Figura 1-1 apresenta os resultados encontrados utilizando o termo *FMEA (Failure Mode e Effect Analysis)*. Foram encontrados 718 trabalhos relacionados ao tema FMEA. Nota-se uma grande quantidade de artigos publicados que envolvem o tema ao longo dos últimos 10 anos.

Para o termo *Agreement Analysis*, foram encontrados 338 trabalhos conforme apresentado na Figura 1-2 com os resultados obtidos para esta consulta. Podemos observar que houve oscilação do número de publicações ao longo dos últimos 25 anos, com máximo de trabalhos publicados no ano de 2013.

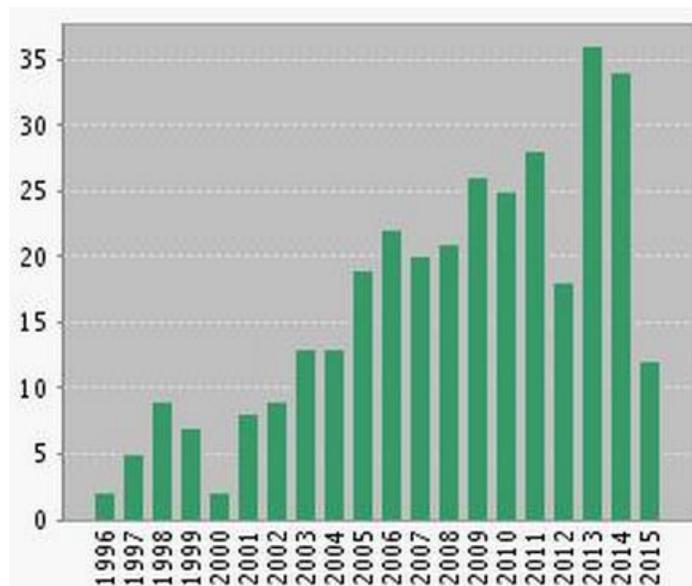


Figura 1-2 Número de publicações por ano sobre Análise de Concordância  
Fonte: adaptado de Web of Knowledge (2015)

A Figura 1-1 e Figura 1-2 apresentam grande número de publicações relacionadas dos termos pesquisados de maneira independente. Porém, a consulta das duas expressões *FMEA* e “*Agreement Analysis*” concomitantemente na base de dados ISI, produz um número consideravelmente inferior, como pode ser observado na Figura 1-3.

Em suma, nota-se que o tema desta dissertação ainda é pouco explorado, pois analisando a Figura 1-3, apenas seis trabalhos surgiram com cruzamento das duas palavras chave. Além disso,

nenhum destes seis trabalhos aplicam de fato a análise de concordância junto ao FMEA, o que reforça ainda mais o ineditismo desta obra de dissertação.

A partir destes dados justifica-se o desdobramento desta pesquisa. Pode-se concluir que com o conhecimento gerado por este projeto espera-se contribuir de maneira significativa para a literatura e para ciência prática.

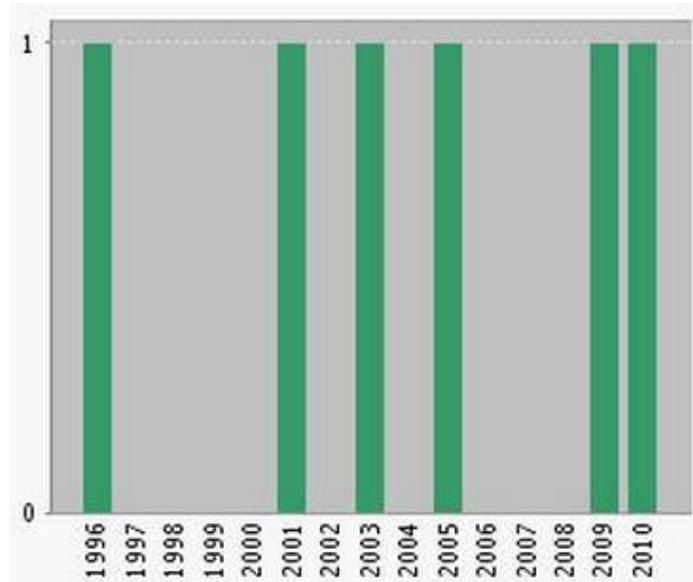


Figura 1-3 Número de publicações por ano sobre FMEA e Análise de Concordância  
Fonte: adaptado de Web of Knowledge (2015)

## 1.2 O problema de pesquisa

Para realizar a tarefa de desenvolver diretrizes contra riscos nos processos, vale a pena reforçar que uma das ferramentas mais utilizadas é o FMEA, que tem enorme importância dentro das organizações para classificar e priorizar diversos modos de falha dos processos. A classificação desses riscos é realizada através de uma escala de 1 a 10, onde é atribuída uma nota para cada um dos modos que são classificados quanto ao risco de falha e seus efeitos, segundo os índices de Severidade, Ocorrência e Detecção. Cada um dos integrantes da equipe que esteja envolvido com o FMEA atribui a nota que julgar ser mais pertinente.

Esse processo pode ser subjetivo e nesta pesquisa levanta-se a importância e necessidade de discutir a concordância das opiniões dos especialistas que desenvolvem o FMEA, pois estão

diretamente ligadas ao sucesso da organização e com outro fator tão importante quanto, que é a segurança dos funcionários e da empresa.

O problema a ser abordado por esta dissertação consiste em responder a seguinte pergunta:

- O FMEA é uma ferramenta qualitativa que apresenta subjetividade no processo de atribuição de suas notas?

## 1.3 Objetivos

Os objetivos de uma pesquisa geralmente são definidos em dois níveis distintos: geral e específicos (PERUCHI, 2011). Para Appolinário (2006), o objetivo de toda pesquisa, de uma maneira geral, será responder ao problema formulado.

Neste trabalho científico temos um objetivo geral e cinco objetivos específicos.

### 1.3.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo geral aplicar a análise de concordância na ferramenta qualitativa FMEA, a fim de desenvolver um estudo da consistência da avaliação dos especialistas e subjetividade presente nesta ferramenta.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Através da aplicação da análise de concordância, várias inferências podem ser realizadas. Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Desenvolver uma matriz de aceitabilidade do FMEA por meio do coeficiente de concordância de Kendall;
- Investigar a habilidade de Repetitividade e Reprodutibilidade dos especialistas com o FMEA;
- Comparar a eficiência do FMEA tradicional com o Fuzzy-FMEA do ponto de vista da análise de concordância;
- Analisar a confiabilidade do FMEA;
- Analisar o grau de cientificidade do FMEA.

## 1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em 5 capítulos:

O Capítulo 1 apresentado fez uma introdução e contextualização sobre o tema, apresentando o problema da pesquisa e os objetivos geral e específicos do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a base teórica desta dissertação. Este capítulo se baseou em estudos de livros, artigos de periódicos e congressos da área da pesquisa. Esta base teórica contempla conceitos importantes sobre o FMEA e o seu desenvolvimento ao longo dos anos, bem como apresenta os problemas e críticas relacionados e uma visão geral sobre a principal tendência aliada ao FMEA que é a utilização da lógica Fuzzy. Os outros dois subcapítulos abordam a análise do sistema de medição (MSA) e GR&R, assim como a análise de concordância por atributos e os indicadores de concordância escolhidos nesta pesquisa.

O Capítulo 3 apresenta o método experimental no qual se conduziu os estudos deste trabalho. Ao longo do capítulo, são apresentados os principais conceitos relacionados a este método de pesquisa, a classificação do trabalho e as etapas que compõem o desenvolvimento da análise dos dados.

O Capítulo 4 é o mais extenso e foi dividido em três partes principais. Na primeira parte, Capítulo 4.1, é mostrada a tabela de classificação da concordância dos avaliadores quanto ao FMEA segundo o coeficiente de concordância de Fleiss' Kappa e o desenvolvimento da matriz de classificação do FMEA a partir do coeficiente de Kendall. A segunda parte desse Capítulo 4 apresenta os resultados e a discussão da pesquisa que estão divididos em dois casos: no Capítulo 4.2, o Caso1, que se trata de um FMEA experimental e o Caso 2, Capítulo 4.3, um Fuzzy-FMEA a partir de dados da literatura. A análise do Caso 1 foi conduzida a partir de um experimento com FMEA onde realizou-se um estudo de GR&R dos especialistas. No Caso 2, a pesquisa aplicou a análise de concordância em um problema da literatura para comparar a eficiência do FMEA tradicional com o Fuzzy-FMEA.

Por fim, o Capítulo 5 encerra a dissertação, apresentando as conclusões, consideração final e sugestões para pesquisas futuras.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Considerações iniciais

Este Capítulo 2 apresenta uma visão crítica das pesquisas que envolvem o objeto de estudo FMEA e as ferramentas que proporcionaram desenvolver a pesquisa.

Inicialmente a fundamentação teórica utilizada para embasar este trabalho apresenta os conceitos e definições sobre o FMEA da maneira mais ampla possível. As seções seguintes discorrem primeiramente sobre a análise do sistema de medição, onde é exibido os conceitos relacionados com estudos de repetitividade e reprodutividade. Em seguida, tem-se as considerações sobre a análise de concordância por atributos e os indicadores de concordância utilizados para investigar a subjetividade do FMEA durante o processo de atribuição de suas notas.

Para a elaboração desta explanação de conceitos do estado da arte foram analisados e estudados artigos de periódicos nacionais e internacionais, livros de autores importantes da área, dissertações e teses.

### 2.2 Análise de falhas potenciais

A análise de falhas potenciais tem grande importância no desenvolvimento e acompanhamento de projetos (ROZENFELD *et al.*, 2006). 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 5462-1994, temos 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 consequentemente 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. Através da Figura 2-1 podemos observar que 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.

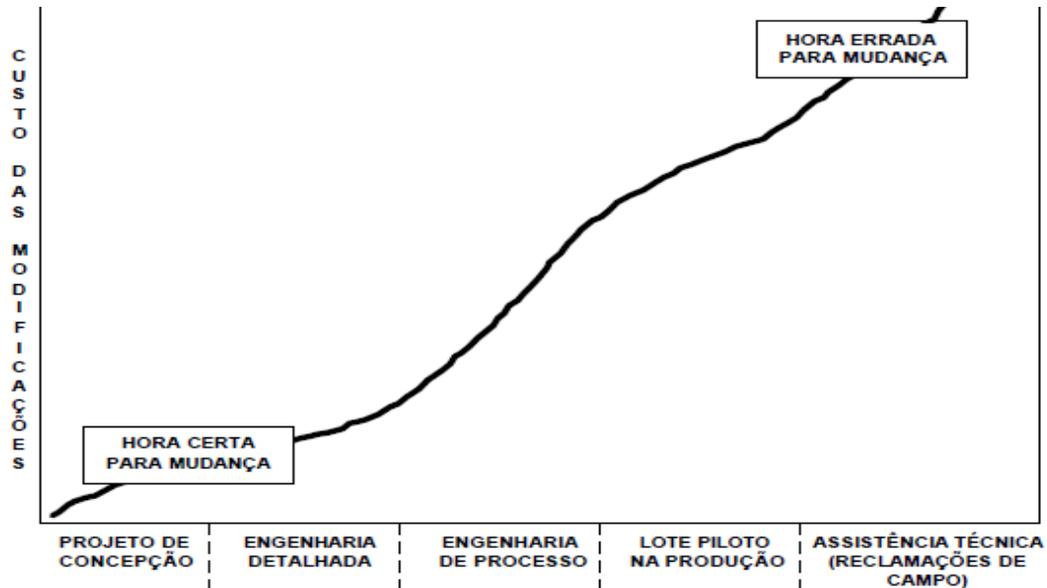


Figura 2-1 Custo de modificações durante um projeto

Fonte: adaptado de Dass, Srivastava e Singh (1993)

Além disso, benefícios financeiros também podem ser alcançados, já que o custo para realizar uma modificação aumenta exponencialmente no decorrer das fases do PDP (ROZENFELD *et al.*, 2006; BOOKER, RAINES e SWIFT, 2001). Então a análise de falhas potenciais se faz jus frente a esses fatores detalhados que regem o desempenho das companhias.

### 2.3 Métodos 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). A partir da Figura 2-2 podemos observar que a medida que houve evolução das atividades de controle da qualidade, novas abordagens surgiram e as metodologias foram se fundindo. Por conseguinte, a melhoria da

qualidade foi aprimorada, assim é possível fazer uma analogia a respeito da crescente exigência e competitividade do mercado ao longo dos anos.

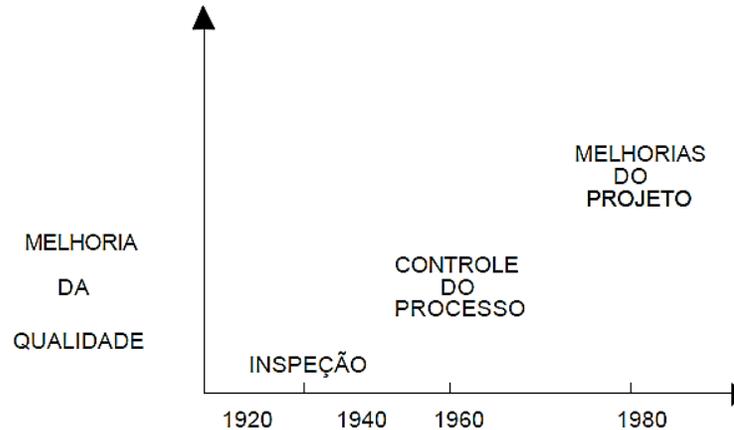


Figura 2-2 Melhoria da qualidade dos processo ao longo dos anos  
Fonte: adaptado de ROZENFELD *et al.* (2006)

Adaptado da obra de Laurenti (2010), temos 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.

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 (Processo de Desenvolvimento de Produtos) (ROZENFELD *et al.*, 2006). Ou seja, dentre vários

métodos e ferramentas que podem ser empregados no PDP para antecipar falhas no projeto (*design*) do produto e de seu processo de fabricação, o FMEA é o mais utilizado (LAURENTI, ROZENFELD e FRANIECK, 2012).

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 estudos dessa pesquisa.

## 2.4 FMEA – Análise dos Modos e Efeitos de Falha

### 2.4.1 Definição

O acrônimo do inglês FMEA é uma abreviação para “*Failure Mode e Effects Analysis*” e tem a tradução livre mais aproximada para o português como Análise dos Modos e Efeitos de Falha. Segundo a ABNT, na norma NBR 5462 (1994), a sigla originária do inglês FMEA também 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).

O termo FMEA será adotado neste trabalho de dissertação por sua relevância amplamente já difundida na Engenharia e por diversos pesquisadores, bem como por ser a forma mais popular encontrada nas bases de dados nacionais e internacionais mais importantes e sua popularidade em indústrias de todo o mundo.

### 2.4.2 O que é o FMEA

O FMEA é uma técnica de análise para definir, identificar e eliminar as falhas desconhecidas e potenciais, problemas, erros e causas, a partir do sistema, projeto, processo ou serviço antes de chegar ao cliente (STAMATIS, 1995). Esta 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).

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). Um bom FMEA auxilia os analistas a identificar os riscos potenciais e seus modos de falha, assim como ajuda a priorizá-los e proporciona focar os esforços para as ações corretivas desses modos de

falha (LIU *et al.*, 2011). Basicamente, a Análise do Modo e Efeito de falha fornece informações necessárias sobre o projeto para a tomada de decisões e gestão do risco (LAURENTI, 2010).

Sankar e Prabhu (2001) afirmam que o FMEA ao longo do tempo provou ser uma ferramenta “útil e poderosa para avaliar possíveis falhas e evitar que elas ocorram”. 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). Crowe e Feinberg (2001) também fizeram afirmações análogas que reforçam que o FMEA é uma abordagem de engenharia que busca proporcionar confiabilidade ao sistema e deve incidir sobre o processo de concepção.

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). Isto é muito importante para a saúde financeira das organizações, porque normalmente muito dinheiro está envolvido nas etapas de produção. Para solucionar esses problemas e danos causados a indenização ao cliente e reparos do erro originado é alto em estágios avançados de desenvolvimento do produto (BAHRAMI, BAZZAZ e SAJJADI, 2012).

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). Segundo a ABNT, o FMEA é uma técnica qualitativa de análise que compreende a observação das formas de falhas que possam acontecer para itens sob investigação, a deliberação dos efeitos de cada uma das maneiras de falha sobre os demais componentes e sobre a função do conjunto em análise NBR 5462 (1994).

Ainda vale a pena ressaltar que o FMEA é uma ferramenta fácil de usar e, mesmo assim, muito poderosa como método de engenharia da qualidade que ajuda a identificar e combater os pontos fracos nas fases desde a concepção inicial de produtos até os processos finais e serviços (PLAZA, 2003). Em outras palavras, este método pode reduzir os erros de desastres, que causam graves prejuízos para a organização que antes não eram tangíveis (BAHRAMI, BAZZAZ e SAJJADI, 2012).

Então, podemos observar que o FMEA 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. Com isso, permite realizar mudanças e reformas de maneira simples e com baixo custo. Sobretudo, a fim de aumentar a eficiência do FMEA, este deve ser aplicado antes do surgimento de erros no sistema e, se possível, nas fases iniciais de PDP.

O seu desenvolvimento e estrutura deve ser elaborado por especialistas em equipe composta por responsáveis de diversas áreas, cuja experiência inclui todos os fatores a serem considerados na análise (ARABIAN-HOSEYNABADI, ORAEE e TAVNER, 2010).

Nos capítulos seguintes é apresentado em detalhes mais informações sobre o FMEA.

### 2.4.3 Histórico do FMEA

Devido a grande necessidade de gerenciar falhas e eliminar os riscos dos projetos, surgiu a obrigação de discutir pela primeira vez uma metodologia que abordasse esses problemas. Nesse contexto, a análise dos modos e efeito de falha foi desenvolvida como uma metodologia de projeto formal na década de 60 pela indústria aeroespacial norte americana - NASA (Bowles & Peláez, 1995). Os motivos para o desenvolvimento dessa ferramenta pela bem referenciada NASA, 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).

Segundo o que Pentti e Atte (2002) asseveram, a origem do FMEA pode ter bases no método que foi desenvolvido e documentado pela primeira vez no procedimento MIL-P-1629 em 1949 pelo Exército dos Estados Unidos. Anos mais tarde, esse procedimento serviu de apoio para elaboração das normas militares MIL-STD-1629 e MIL-STD-1629A que foram utilizados até o início do século XXI (PENTTI e ATTE, 2002).

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. Este movimento também foi seguido pela indústria automobilística alemã. O procedimento de aplicação do FMEA definido pela VDA (*Verband der Automobilindustrie – German Association of the Automotive Industry*) é o mais usado na Europa (BERTSCHE, 2008). Até hoje, aplicar o FMEA é um requisito obrigatório para os fornecedores no setor de autopeças.

Além da indústria automotiva, ainda merece ênfase que o método é o mais utilizado na indústria em geral, para antecipar falhas nos projetos e de seu processo de fabricação, segundo diversos autores já descritos anteriormente (STAMATIS, 1995; HAWKINS e WOOLLONS, 1998; STONE, TUMER e STOCK, 2005) .

Assim, como podemos observar, desde a introdução do FMEA pela AIAG em 1980, o FMEA ganhou espaço e a preferência das indústrias pela obrigatoriedade e também em virtude de sua praticidade e benefícios. Aliás, o emprego dos procedimentos FMEA à área de prestação de serviços foi relacionado por Stamatis em 1995 e Palady em 1997. Em suma, estes autores compartilham dos conceitos de que o FMEA proporcionou a melhoria na qualidade, segurança e confiabilidade de produtos e dos serviços. Não obstante, relataram que a metodologia traz considerável contribuição para a melhoria na imagem e competitividade das empresas frente aos seus clientes, bem como auxilia na identificação de redundâncias no processo de prestação de serviços e/ou na elaboração do produto. Isso tudo certamente irá implicar positivamente na maior satisfação dos clientes (PALADY, 1997).

Atualmente, o trabalho mais contemporâneo de revisão da literatura, cujo também é a principal referência desta dissertação, o artigo de revisão de Liu, Liu, e Liu (2013) reafirmam que o FMEA é uma ferramenta de avaliação de risco que atenua falhas potenciais em sistemas, processos, projetos ou serviços e tem sido utilizado em uma ampla gama de indústrias. 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.

Mais exemplos e aplicabilidades do FMEA em outros campos estão em detalhes no Capítulo 2.4.9 adiante.

#### 2.4.4 Objetivos do FMEA

Existem diversos tipos de FMEA que abordam objetos de estudo de maneiras diferentes e visam atingir metas diferentes. Os principais objetivos do FMEA são comentados por diversos autores e, por isso, optou-se selecionar as fontes mais recentes e relevantes. O maior consenso das opiniões está sob a perspectiva de que o FMEA permite aos especialistas que identifiquem e previnam problemas conhecidos e potenciais antes de chegar ao cliente.

Para este fim, os riscos de cada modo de falha identificados precisam ser avaliados e priorizados para que possam ser tomadas as ações corretivas apropriadas para os diferentes modos de falha (LIU *et al.*, 2011). 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 os mesmos autores, outro objetivo do FMEA é priorizar os modos de falha do produto ou sistema, a fim de atribuir os recursos limitados aos itens de risco mais graves (LIU, LIU e LIU, 2013).

Mais uma finalidade para o FMEA é que pode ser definido como uma das técnicas mais conhecidas de gestão da qualidade que é usado para melhorias contínuas em projetos de produtos ou processos. Esta ferramenta prova ser uma das ações preventivas precoces mais importantes no sistema, processo ou serviço, que irá evitar que falhas e erros ocorram e atinjam o cliente (WANG, 2009).

A obra de Pillay e Wang (2003) busca cumprir os objetivos do FMEA, frisando que o foco é tornar os sistemas mais seguros e mais confiáveis através de:

- 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:

- 1) Uma forma sistemática de catalogar informações sobre as falhas dos produtos ou processos;
- 2) Melhorar o conhecimento dos problemas nos produtos ou processos;
- 3) Conduzir à ações de melhoria no projeto do produto ou processo, baseadas em dados e devidamente monitoradas (melhoria contínua);
- 4) Diminuir custos por meio da prevenção de ocorrência de falhas;
- 5) 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 tudo, 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, podemos 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.

#### 2.4.5 Tipos de FMEA

A metodologia FMEA pode ser aplicada em diversos ramos e atividade como vimos nos capítulos anteriores. Inicialmente, o FMEA era limitado ao desenvolvimento do projeto do produto e do processo. Com o passar do tempo, as etapas e a maneira de realização da análise não foram modificadas, mas o FMEA sofreu mudanças para que fosse possível atingir as suas metas, mesmo que aplicado em diferentes objetos de estudo.

De acordo com o trabalho clássico publicado por Stamatis em 1995, e que é 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:

- 1) 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;
- 2) FMEA de projeto – usado para analisar produtos antes que eles sejam liberados para manufatura. O FMEA de projeto enfoca os modos potenciais de falha causados pelas deficiências do projeto;
- 3) 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;
- 4) 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. Podemos observar o Quadro 2-1 Relevância do tipo de FMEA e identificar qual é mais conveniente para cada situação.

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 Identifica as deficiências das tarefas.
	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 tarefas críticas ou significativas e ajuda no desenvolvimento dos planos de controle.
	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.	Estabelece uma prioridade para as ações de melhoria.
		Ajuda a identificar antecipadamente as falhas, nas fases de desenvolvimento do produto.		
Documenta as razões para as mudanças.				

#### 2.4.6 Estrutura do FMEA

Ao longo dos anos, várias variações do FMEA tradicional têm sido desenvolvidas. Ferramentas de apoio ao FMEA têm sido paulatinamente propostas e incorporadas, como: a lógica Fuzzy (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 LAPA, 2004; GUIMARÃES e LAPA, 2007) com o QFD (CHEN e KO, 2009b), FCM (Mapas Cognitivos *Fuzzy*) (PELÁEZ, 1996), Teoria da evidência (Evidence Theory) (CHIN *et al.*, 2009b; YANG *et al.*, 2011), automação do processo do FMEA (RUSSOMANNO, 1994; PRICE, 1995), simulação de Monte Carlo (BEVILACQUA *et al.*, 2000), distribuição de probabilidades (SANT'ANNA, 2012), DEA (GARCIA *et al.*, 2005), CHANG e SUN, 2009; CHIN *et al.*, 2009a), TOPSIS (BRAGLIA *et al.*, 2003b), AHP e ANP (BRAGLIA e BEVILACQUA, 2000; CARMIGNANI, 2009; HU *et al.*, 2009; ZAMMORI e GABBRIELLI, 2011), programação linear (WANG *et al.*, 2009b; GARGAMA e CHATURVEDI, 2011; CHEN e KO, 2009a, 2009b).

Apesar disso tudo, a estrutura básica do FMEA sempre é mantida, isto é, a sua composição compreende as quatro etapas: planejamento, análise das potenciais falhas, avaliação dos riscos e melhoria (SANT`ANNA e JUNIOR, 2010).

De maneira pragmática, a estrutura do FMEA pode ser representada através da Figura 2-3, que retrata a evolução do FMEA com as etapas descritas por Sant`Anna e Junior (2010) suplementadas com as ações (melhoria) e por fim a verificação da eficácia do FMEA. Tudo isso com a interação dos especialistas (gerentes de projetos e Staff técnico).



Figura 2-3 Estrutura do FMEA

## 2.4.7 Elaboração do FMEA

O FMEA é desenvolvido por um grupo composto de diversos especialistas de diversas áreas. Essa análise versa na formação de uma equipe que identificam para o processo as suas funções, os tipos de falhas que podem acontecer, os efeitos e as possíveis causas desta falha.

*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.

Nos próximos subcapítulos temos o conteúdo do FMEA detalhado que conta com o as equipes de avaliação, o formulário FMEA e os índices de risco.

### 2.4.7.1 Equipes de avaliadores do FMEA

O número de componentes pode variar, mas geralmente tem-se entre três e seis pessoas. O manual da AIAG (2008) aponta que o tamanho da equipe depende da complexidade do item e do porte da organização (AIAG, 2008). Porém, se a equipe contiver mais de sete ou oito membros, o dinamismo das discussões da equipe 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).



Figura 2-4 Ilustração do time FMEA - composto por colaboradores da área de Projeto, Planejamento da produção, Produção, Vendas, Suprimentos, Qualidade, Teste e Manufatura  
Fonte: adaptado de Laurenti (2010)

A equipe deve conter os representantes das áreas envolvidas com o projeto que se deseja analisar, isto é, o pessoal que compõe a equipe é de áreas como a manutenção, gerência, financeiro, projetistas, analistas, engenheiros de processo e encarregados (ver Figura 2-4). Sobretudo, a equipe formada 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 equipe escolhida deve ter característica multifuncional com especialistas de vários departamentos de maneira democrática. De acordo com a obra de Mcdermott, Mikulak e Beauregard (2009), deve ser realizada uma sessão de FMEA, onde são reunidas pessoas advindas de diferentes áreas de empresa, com conhecimentos técnicos variados, para se determinar, de

maneira sistemática, todos os possíveis modos de falha potencial, os efeitos e as causas de cada modo de falha sobre o desempenho do produto, avaliar os riscos e especificar ações de melhoria.

Normalmente, a equipe é formada na fase de planejamento de um novo produto com base em uma abordagem de engenharia simultânea. A equipe analisa cada componente e subsistema do produto para os modos de falha. Em seguida, as causas e os efeitos potenciais são determinados (SELLAPPAN, OMAN e PALANIKUMAR, 2013).

Sobretudo, a realização do FMEA depende da habilidade individual dos seus executores e do conhecimento geral que o equipe pode proporcionar. Essa característica é necessária devido ao fato da análise dos itens a falhar ser baseado nessa experiência, bem como no conhecimento histórico e em assuntos passados sobre como o produto ou processo tem evoluído.

Portanto, os pré-requisitos para o sucesso da utilização do FMEA é ter capacidade total e conhecimento dos modos de falha e seus efeitos para avaliá-los. 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.

#### **2.4.7.2 Formulário 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.

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. Especialistas de áreas diferentes devem ser capazes de explicar os modos de falha do sistema sob observação.</p>
<p>Examinar: efeito (s) de falha: a consequência de cada modo de falha devem ser cuidadosamente examinada e registrada.</p>

Fonte: adaptado de Modarres (1993)

Para a construção do 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.

Mais informações e procedimentos detalhados sobre como realizar o formulário FMEA e suas várias aplicações nas diferentes indústrias estão documentados em Stamatis (1995), Sankar e Prabhu (2001), Bowles e Peláez (1995), Moss e Woodhouse (1999), Xu *et al.* (2002), Zafiropoulos 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).

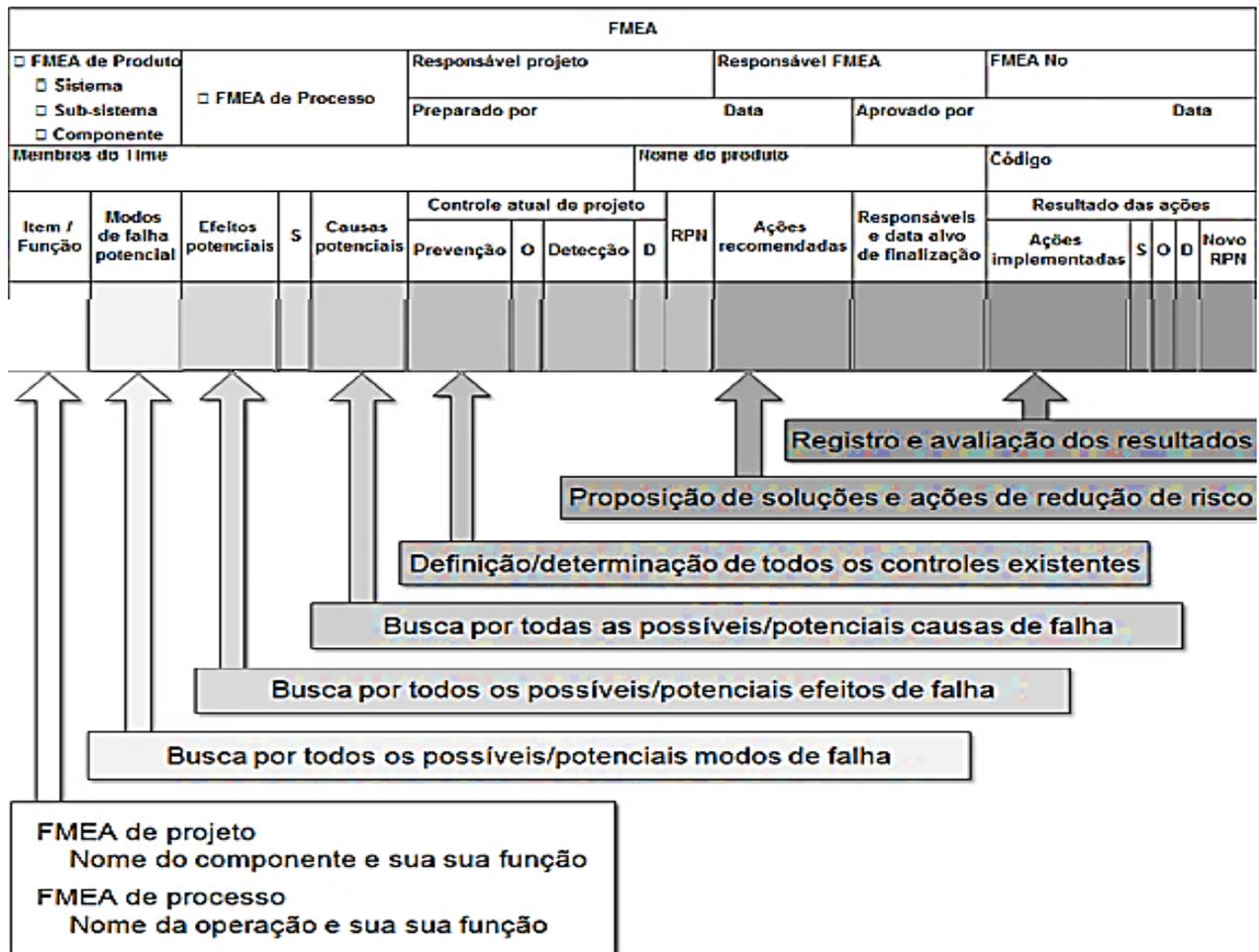


Figura 2-5 Formulário FMEA genérico  
 Fonte: adaptado do manual da AIAG (2008) e Bertsche (2008)

Na Figura 2-5 é apresentado um formulário FMEA genérico proposto pela AIAG (2008) e por Bertsche (2008).

### 2.4.7.3 Índices de Risco

Os índices 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 possíveis 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.

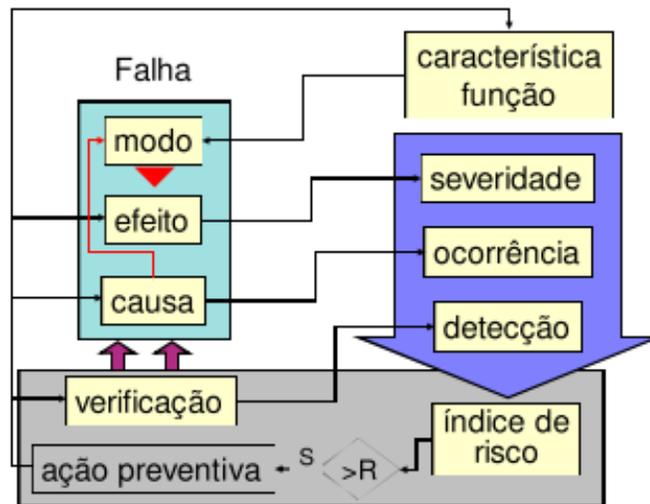


Figura 2-6 Visão estrutural das informações do FMEA  
Fonte: ROZENFELD *et al.* (2006)

A Figura 2-6 de Rozenfeld *et al.* (2006) apresenta o formulário FMEA e o processo de atribuição das notas aos modos de falha através dos índices de risco com perspectiva estrutural.

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.

Em suma, a gravidade (S), ocorrência (O), e detecção (D) são indicadores de priorização do FMEA e são escalas ordinais discretas de medida (CHANG, CHANG e TSAI, 2013). A próxima etapa, após a classificação por meio dos índices S, O e D, é o cálculo do RPN e está em detalhes na próxima seção.

#### 2.4.7.3.1 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, que é o 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), isto é, esse número é obtido através da Equação (1):

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

Dessa maneira, o cálculo do RPN permite a análise do sistema. Sobre sua grandeza, quanto mais alto 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).

#### 2.4.8 Desenvolvimento do FMEA

FMEA é uma abordagem estruturada, de *bottom – up* (de baixo para cima) que começa com conhecidos e possíveis modos de falha em um nível e investiga o efeito sobre o próximo

nível do subsistema e, portanto, uma análise completa que abrangem todos os níveis na hierarquia de *bottom – up* (SHARMA *et al.*, 2005).

A fim de analisar um produto ou sistema específico, deve ser estabelecida uma equipe multifuncional para a realização do FMEA como descrito anteriormente. O primeiro passo do FMEA é identificar todos os possíveis modos de falhas potenciais do produto/sistema através de sessão de debate sistemática (*brainstorming*). Conforme o Capítulo 2.4.7.2 é estabelecido o formulário FMEA.

Depois disso, é realizada a análise crítica destes modos de falha, tendo em conta os fatores do índice de risco: Severidade, Ocorrência e de Detecção, bem como o cálculo do RPN, explicados nos Capítulos 2.4.7.3e 2.4.7.3.1 anteriores.

Quadro 2-3 Desenvolvimento do FMEA

Classificar os modos de falha quanto a Severidade, Ocorrência e Detecção: classificar e ranquear por RPN os itens;
Detectar as falha e corrigir: todas as falhas detectadas devem ser corrigidas para eliminar a sua propagação a todo o sistema e para maximizar a confiabilidade.
Observações: toda a informação pertinente deve ser observada para que seja possível a melhoria contínua

Fonte: Modarres (1993)

A partir do Quadro 2-2 Etapas de elaboração do Formulário FMEA” da obra de Modarres (1993), onde o autor descreve a criação de um FMEA, podemos dar continuidade, após o desenvolvimento do formulário, com as seguintes etapas descritas no Quadro 2-3.

Os resultados das sessões de FMEA são registrados em um formulário, que sempre deve ser revisado e atualizado (AIAG, 2008). Portanto, a execução do FMEA deve ser contínua, acompanhando o ciclo de desenvolvimento do sistema, não devendo o formulário ser tratado como um documento estático (BERTSCHE, 2008). Desse modo, a evolução do projeto é documentada sistematicamente e a aplicação do conceito de melhoria contínua é estimulada (FRANCESCHINI e GALETTO, 2001).

As causas da falha são referidas como sendo causas profundas e podem ser definidas como mecanismos que levam à ocorrência de uma falha. Modos de falha são as diferentes

maneiras em que um componente pode falhar. É extremamente importante perceber que um modo de falha não é a causa de uma falha, mas a maneira que ocorreu uma falha.

Os efeitos de uma falha podem ser frequentemente ligados às causas de raízes de um novo fracasso e é essa uma das funções do FMEA, encontrar essas falhas através da discussão e reflexão da equipe e priorizá-las.

Vale a pena ressaltar que o desenvolvimento do FMEA tem etapas definidas como num algoritmo, que conduzem e permitem atingir os objetivos desse instrumento.

#### **2.4.9 Aplicações do FMEA**

Como paulatinamente foi frisada nos capítulos anteriores, a metodologia FMEA tem provado ser uma ferramenta útil e poderosa para avaliar possíveis falhas e evitar que elas ocorram (SANKAR & PRABHU, 2001).

Destacamos que 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 até no setor médico (EBELING, 2000; GILCHRIST, 1993; O'CONNOR, 2000).

Palady (1997) defende que no setor de serviços as técnicas qualitativas do FMEA contribuem no sentido da diminuição do tempo e custo do desenvolvimento do processo/produto e na identificação dos procedimentos desenvolvidos, elaboração dos diagnósticos de falhas, levantamento das ações corretivas, prevenção das falhas e priorização das ações corretivas, assim como na redução dos riscos e das falhas.

A análise proporcionada pelo FMEA indica que é o melhor candidato para análise de confiabilidade na fase de concepção, é bem definido e tem sido usado por muitos sistemas de engenharia de geração de energia (ARABIAN-HOSEYNABADI, ORAEE, e TAVNER, 2010).

O trabalho recente dos autores (CHANG, CHANG e TSAI, 2013), também diz que o FMEA é uma ferramenta amplamente utilizada em indústrias, como a aviação, automotivo, máquinas, médico, indústria alimentar, metalúrgica e de semicondutores.

Em resumo, o FMEA de fato tem vasta aplicabilidade. Este instrumento já foi empregado em áreas completamente diferentes, por ser de fácil manipulação, acesso e desenvolvimento.

Sobre 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)”. Dessa maneira, os fornecedores da Crysler, Ford e GM devem analisar todos os manuais em conjunto com a norma ISO/TS 16949 para se adequarem como fornecedores.

#### **2.4.10 Análise crítica sobre o FMEA**

O FMEA apesar de toda sua funcionalidade tem algumas deficiências que devem ser destacadas. Do ponto de vista de diversos autores, a sua operacionalização é questionável como Hawkins e Woollons (1998) apontaram que uma das críticas a respeito do uso do FMEA é o tempo consumido.

Além desse tipo de deficiência relativa à empregabilidade do FMEA, o trabalho de revisão da literatura de Liu, Liu e Liu (2013) levantou todas as deficiências exploradas e discutidas presentes em 75 artigos desde o ano de 1992 até 2012. O Quadro 2-4, Quadro 2-5 e o Quadro 2-6 trazem em detalhes as deficiências investigadas por diversos autores que foram contabilizadas por Liu, Liu e Liu (2013).

Das críticas ao FMEA, vale a pena salientar que a demasiadamente considerada é sobre o RPN. A maioria dos métodos utiliza o valor do número de prioridade de risco (RPN) para avaliar o risco do objeto em estudo.

No entanto, 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, onde dos 75 artigos pesquisados, 45 apontam como deficiência. Essa grande variedade de críticas pode ser observada no Quadro 2-4.

Sobretudo, consideremos também um dos maiores pontos fracos do FMEA, presente em muitas ferramentas qualitativas e que, igualmente é o tema abordado neste trabalho de dissertação sobre o FMEA, que é a subjetividade desse instrumento. O tópico subjetividade do FMEA será especialmente abordado no próximo capítulo.

Quadro 2-4 As principais deficiências do FMEA – Parte I

Deficiências	Autor (es)	Total
<p>A importância relativa entre O, S e D não é levada em consideração. As suas implicações de risco escondidos podem ser totalmente diferentes.</p>	<p>Wang <i>et al.</i> (2009b), Chin <i>et al.</i> (2009a, 2009b), Liu <i>et al.</i> (2011, 2012), Gargama e Chaturvedi (2011), Kutlu e Ekmekçioğ lu (2012), Zhang e Chu (2011), Yang <i>et al.</i> (2008), Braglia <i>et al.</i> (2003a, 2003b), Sharma <i>et al.</i> (2005, 2007a, 2007b, 2007c, 2007d, 2008a, 2008b, 2008c), Sharma e Sharma (2012, 2010), Chang e Cheng (2011, 2010), Chang e Wen (2010), Chang <i>et al.</i> (2010, 1999, 2001), Seyed- Hosseini <i>et al.</i> (2006), Tay e Lim (2010, 2006a), Keskin e Zkan (2009), Pillay e Wang (2003), Bowles e Peláez (1995), von Ahsen (2008), Carmignani (2009), Xiao <i>et al.</i> (2011), Franceschini e Galetto (2001), Nepal <i>et al.</i> (2008), Sankar e Prabhu (2001), Zammori e Gabbrielli (2011), Abdelgawad e Fayek (2010), Shahin (2004), Puente <i>et al.</i> (2002), Garcia <i>et al.</i> (2005), Chang e Sun (2009)</p>	45
<p>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.</p>	<p>Wang <i>et al.</i> (2009b), Chin <i>et al.</i> (2009a, 2009b), Liu <i>et al.</i> (2011, 2012), Gargama e Chaturvedi (2011), Kutlu e Ekmekçioğ lu (2012), Zhang e Chu (2011), Yang <i>et al.</i> (2008), Braglia <i>et al.</i> (2003b), Sharma <i>et al.</i> (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 <i>et al.</i> (1999, 2001), Shahin (2004), Puente <i>et al.</i> (2002), Chang e Sun (2009)</p>	33

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

Quadro 2-5 As principais deficiências do FMEA - Parte II

Deficiências	Autor(es)	Total
Os três índices de risco são difíceis de ser precisamente avaliadas	Wang <i>et al.</i> (2009b), Chin <i>et al.</i> (2009a, 2009b), Liu <i>et al.</i> (2011, 2012), Gargama e Chaturvedi (2011), Kutlu e Ekmekçiog̃ lu (2012), Yang <i>et al.</i> (2008), Braglia <i>et al.</i> (2003a, 2003b), Sharma <i>et al.</i> (2005), Chang <i>et al.</i> (2010), Xu <i>et al.</i> (2002), Braglia (2000), Yang <i>et al.</i> (2011), Chen e Ko (2009a, 2009b), Zammori e Gabbrielli (2011), Abdelgawad e Fayek (2010), Garcia <i>et al.</i> (2005)	21
A fórmula matemática para o cálculo RPN é questionável e discutível	Chin <i>et al.</i> (2009a, 2009b), Liu <i>et al.</i> (2011, 2012), Gargama e Chaturvedi (2011), Kutlu e Ekmekçiog̃ lu (2012), Braglia <i>et al.</i> (2003a, 2003b), Geum <i>et al.</i> (2011), Chang <i>et al.</i> (1999, 2001), Puente <i>et al.</i> (2002), Ben-Daya e Raouf (1996), Gilchrist (1993)	14
A conversão de pontuações é diferente para os três fatores de risco	Chin <i>et al.</i> (2009b), Liu <i>et al.</i> (2011), Braglia <i>et al.</i> (2003a, 2003b), Chen (2007), von Ahsen (2008), Carmignani (2009), Chang <i>et al.</i> (1999, 2001), Sankar e Prabhu (2001), Puente <i>et al.</i> (2002), Ben-Daya e Raouf (1996), Gilchrist (1993)	13
O RPN não pode ser usado para medir a eficácia das ações corretivas	Yang <i>et al.</i> (2008), Braglia <i>et al.</i> (2003b, 2007), Pillay e Wang (2003), Chen (2007), Carmignani (2009), Chang <i>et al.</i> (1999, 2001), Shahin (2004), Puente <i>et al.</i> (2002), Ben-Daya e Raouf (1996), Gilchrist (1993)	12

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

Quadro 2-6 As principais deficiências do FMEA - Parte III

<b>Deficiências</b>	<b>Autor(es)</b>	<b>Total</b>
RPN's não são números contínuos. Isso acarreta em discrepâncias por ser um número discreto	Liu <i>et al.</i> (2012), Chang e Cheng (2011, 2010), Chang <i>et al.</i> (2010), Chang (2009), Keskin e Zkan (2009), Carmignani (2009), Franceschini e Galetto (2001), Garcia <i>et al.</i> (2005), Chang e Sun (2009)	10
As interdependências entre os vários modos de falha e efeitos não são levados em conta	Xu <i>et al.</i> (2002), Chin <i>et al.</i> (2008), Braglia <i>et al.</i> (2007), von Ahsen (2008), Carmignani (2009), Nepal <i>et al.</i> (2008), Zammori e Gabbrielli (2011), Shahin (2004), Chang e Sun (2009), Gandhi e Agrawal (1992)	10
A forma matemática adotada para o cálculo do RPN é muito sensível a variações na avaliação dos fatores de risco	Chin <i>et al.</i> (2009b), Liu <i>et al.</i> (2011, 2012), Gargama e Chaturvedi (2011), Kutlu e Ekmekçioğ lu (2012), Yang <i>et al.</i> (2008), Braglia <i>et al.</i> (2003a, 2003b), Chang (2009)	9
Os elementos RPN têm muitos números duplicados	Gargama e Chaturvedi (2011), Chang e Cheng (2011, 2010), Chang <i>et al.</i> (2010), Chang (2009), Seyed-Hosseini <i>et al.</i> (2006), Sankar e Prabhu (2001), Garcia <i>et al.</i> (2005), Chang e Sun (2009)	9
A RPN considera apenas três fatores de risco, principalmente em termos de segurança	Chin <i>et al.</i> (2009b), Liu <i>et al.</i> (2011), Yang <i>et al.</i> (2008), Braglia <i>et al.</i> (2003a, 2003b), Chang e Cheng (2010), Braglia (2000), Carmignani (2009), Zammori e Gabbrielli (2011)	9

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

#### 2.4.11 Subjetividade do FMEA

O FMEA é uma análise formal, mas subjetivo para identificação sistemática de possíveis causas principais e modos de falha e para estimativa dos seus riscos relativos (ARABIAN-

HOSEYNABADI, ORAEE e TAVNER, 2010). Existe um elevado nível de incerteza no FMEA já 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).

A grande subjetividade está presente nas escalas dos índices de severidade, ocorrência e detecção do FMEA e isso o torna questionável. Deve-se sempre definir escalas e componentes que sejam dependentes de fatores externos para auxiliar na classificação, como pode ser observado no amplo número de artigos na revisão realizada por Liu, Liu e Liu (2013) que apontam dificuldades com o RPN. Para 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.

Além do mais, podemos 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 a 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 deve-se 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 equipe.

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 sobrepõe 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.

Esses aspectos afetam demasiadamente o FMEA salientando ainda mais a sua subjetividade. Segundo a obra de Laurenti (2010), vale a pena ressaltar que deve-se atentar 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); ou seja, o que torna a opinião subjetiva.

Experiências práticas e a análise da literatura mostram que um avaliador do FMEA pode não ser confiável o suficiente para atribuir as notas ao FMEA, pois seus conceitos são intrínsecos a sua própria opinião e, portanto, são muitas vezes subjetivos.

#### **2.4.11.1 Pesquisas relacionadas à subjetividade do FMEA**

Para suplantar os problemas de subjetividade do FMEA, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas para se encontrar um padrão-ouro de avaliação dos componentes do FMEA que 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 a revisão da literatura sobre o FMEA de Liu, Liu e Liu (2013).

Contudo, relacionado à subjetividade do FMEA, atualmente a grande tendência é a integração Fuzzy-FMEA, de acordo com a revisão da literatura de Liu, Liu e Liu (2013). Bowles

e Pelaez (1995) deram início a utilização do FMEA aliado à lógica Fuzzy, que passou por adaptações nos últimos vinte 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 essa metodologia foi ganhando popularidade e melhorias foram 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 da lógica Fuzzy.

Segundo a revisão de Liu, Liu e Liu (2013), a técnica foi empregada 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 Fuzzy-FMEA, que podem ser conferidos diretamente nas obras de Zafiroopoulos 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), bem como no trabalho de Helvacioğlu e Ozen (2014).

Este último é um dos objetos de estudos dessa dissertação denominado Caso 2 (Capítulo 4.3) que visa comparar o FMEA tradicional ao Fuzzy-FMEA por meio da análise de concordância e explorar informações sobre a subjetividade desses instrumentos, assim como definir qual ferramenta é melhor.

## **2.5 Análise do sistema de medição – MSA**

Um questionamento comum encontrado na biologia reprodutiva é se ou não a medição de uma variável, por dois métodos diferentes, ou através de dois operadores diferentes, utilizando a mesma metodologia, ou por um operador que realize a repetição da 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 Definições da 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.

No trabalho dos autores HAJIPOUR, KAZEMI e MOUSAVI (2013), eles discorreram 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 disso, a MSA 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 Objetivos da 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 Repetitividade e Reprodutividade (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 dissertação, a abordagem MSA, devido às características estatísticas, são diferentes da abordagem que se desenvolve para dados contínuos. Tendo a necessidade de separar esses tipos de análises, temos uma seção especial que está apresentada em detalhes no Capítulo 2.6, tratando da aplicação da MSA por GR&R atributos que está intitulada como Análise de Concordância.

No capítulo seguinte, trazemos 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:

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

Onde  $\sigma_{peça}^2$  é o componente de variância devido ao produto/item e  $\sigma_{medição}^2$  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):

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

Onde  $\sigma_{Repetitividade}^2$  representa Repetitividade e  $\sigma_{Reprodutividade}^2$  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

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 queremos dizer a medida, cuja 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).

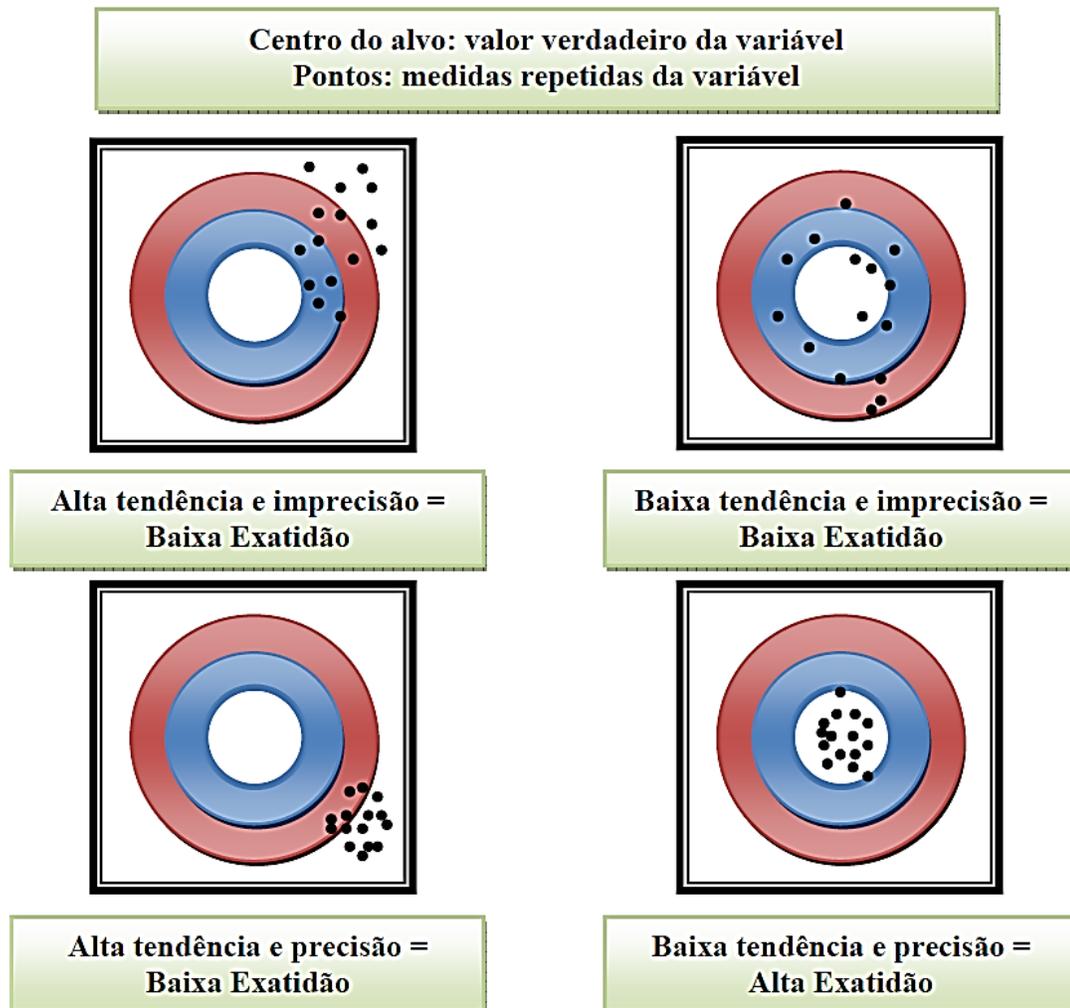


Figura 2-7 Ilustração da exatidão, tendência e precisão  
Fonte: adaptado de Werkema (2006)

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 em 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 intra-indivíduos (*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 e 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 muito bem 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, onde:

- 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 tem 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 o mesmo 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 dissertação 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 se dois ou mais avaliadores utilizando o mesmo método de avaliação obtém o mesmo desempenho no FMEA ou se dois avaliadores avaliando um mesmo modo de falha, em circunstâncias idênticas, produzem essencialmente 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 tem divergências com relação a sua classificação. Segundo Allen e Yen (1979), os dados atributos podem ser de considerados somente de dois tipos: nominal ou ordinal, onde:

- 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 podemos 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 ainda 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 dissertação, o objeto de estudo é o FMEA, que se trata de um instrumento qualitativo, onde 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 utilizar estatística não paramétrica, 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 (*standart*), 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)

### 2.6.3.1 Objetivos da GR&R por atributos

A principal meta da análise por GR&R 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.

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 Repetitividade e Reprodutividade. Se os colaboradores estão de

acordo, é sinal de que as classificações são precisas e as suas avaliações não são questionáveis e limitadas.

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?

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, extraindo 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. Esses indicadores expressam o nível de concordância das avaliações sob a forma de um número coeficiente que varia numa escala de 0 a 1. Esses 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, podemos destacar alguns dos principais, que são os coeficientes de Kappa, Fleiss' Kappa, Kendall, 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 vimos nas seções anteriores, existem três tipos de dados: nominais, binários ou ordinais. Neste trabalho de dissertação, 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 postos 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), 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, podemos 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. Dessa maneira, 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, 1971).

Então, a análise de concordância GR&R atributos aplicada ao FMEA nesta obra de dissertação 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.

A escolha destes indicadores levaram 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), onde é frequentemente empregado para avaliar sistemas de medição em escalas nominais (DE MAST e VAN WIERINGEN, 2004).

*A priori*, estamos interessados 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 de acordo dos observadores (*Between*) ou entre 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 é parte integrante do Manual de Análise de Sistemas de Medição AIAG (AIAG, 2002), parte do 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):

$$\text{Kappa} = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e} \quad (5)$$

Onde:

$P_0$  – proporção de k vezes em que os avaliadores concordaram, calculado através da Equação (6):

$$P_0 = \frac{1}{Nn * (n - 1)} \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k x_{ij}^2 - Nn \right) \quad (6)$$

$P_e$  – 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:

$p_j$  – 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)

Teste de Hipóteses para Fleiss' Kappa
<b><math>P - valor &gt; 0,05</math></b> , $H_0$ é aceito e indica que o índice de Fleiss' Kappa não é significativo, ou seja, a hipótese nula não pode ser rejeitada.
<b><math>P - valor &lt; 0,05</math></b> , $H_0$ 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) onde 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 ( $\tau$ ) de Kendall
- Coeficiente de concordância W de Kendall

#### 2.6.5.2.1 O coeficiente de correlação Tau ( $\tau$ ) de Kendall

Se os dados tem 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  $\tau$  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  $\tau$  de Kendall.

O coeficiente de correlação por postos de  $\tau$  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,  $\tau$  de Kendall mede a diferença entre a probabilidade das 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).

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

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 dissertação, pois se adequa as exigências da pesquisa, ao contrário do índice de  $\tau$  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 onde 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) abaixo:

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

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.

No entanto, 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).

Dessa maneira, 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

$g_j$  – 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 do 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 são 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.

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

<b>Teste de Hipóteses para W de Kendall</b>
<b><math>P - valor &gt; 0,05</math></b> , $H_0$ é aceito e indica que o índice de Kendall não é significativo, ou seja, a hipótese nula não pode ser rejeitada.
<b><math>P - valor &lt; 0,05</math></b> , $H_0$ é rejeitada e implica que existe significativa concordância entre os observadores.

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".

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 4.1.3.

### 2.6.5.3 Porcentagem de concordância

Além do cálculo da concordância através dos índices de concordância, optou-se por expressar essa associação através de porcentagem. Todas as tabelas de concordância incluem número de inspeção, número de acerto, porcentagem de concordância e intervalo de confiança de 95%. A porcentagem de concordância a partir do software Minitab® é calculada para 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  $\alpha$  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  $\alpha$  ao invés de  $\alpha/2$  na Equação (15). Se a porcentagem é igual a um (concordância perfeita), o limite superior é igual a 1.

## 2.7 Considerações finais

Este capítulo de revisão da literatura teve como objetivo apresentar todo o suporte teórico necessário para o desenvolvimento e entendimento desta pesquisa, que está em detalhes nos próximos capítulos. Uma revisão abrangente sobre o FMEA foi realizada, bem como o destaque dos seus pontos negativos até chegar ao problema de pesquisa dessa dissertação: a subjetividade envolvida no processo de atribuição de notas ao FMEA. Os conceitos básicos sobre MSA e mais

detalhado sobre GR&R por atributos também foram percorridos, a fim de embasar as análises e proporcionar a discussão dos resultados desta obra.

## 3. MÉTODO DE PESQUISA

### 3.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta a classificação desta pesquisa científica, quanto à natureza, aos objetivos, a abordagem e ao método. Em seguida, ainda é apresentada a definição do método experimental, o desenvolvimento da análise estatística e o desenvolvimento da pesquisa, bem como será discutida.

### 3.2 Classificação da pesquisa científica

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 identificação das mesmas. Esta dissertação 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:

- Experimento, porque 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.

A Figura 3-1 ilustra as etapas que embasam a pesquisa e permitem a sua classificação científica, segundo a metodologia proposta por Miguel *et al.* (2010).

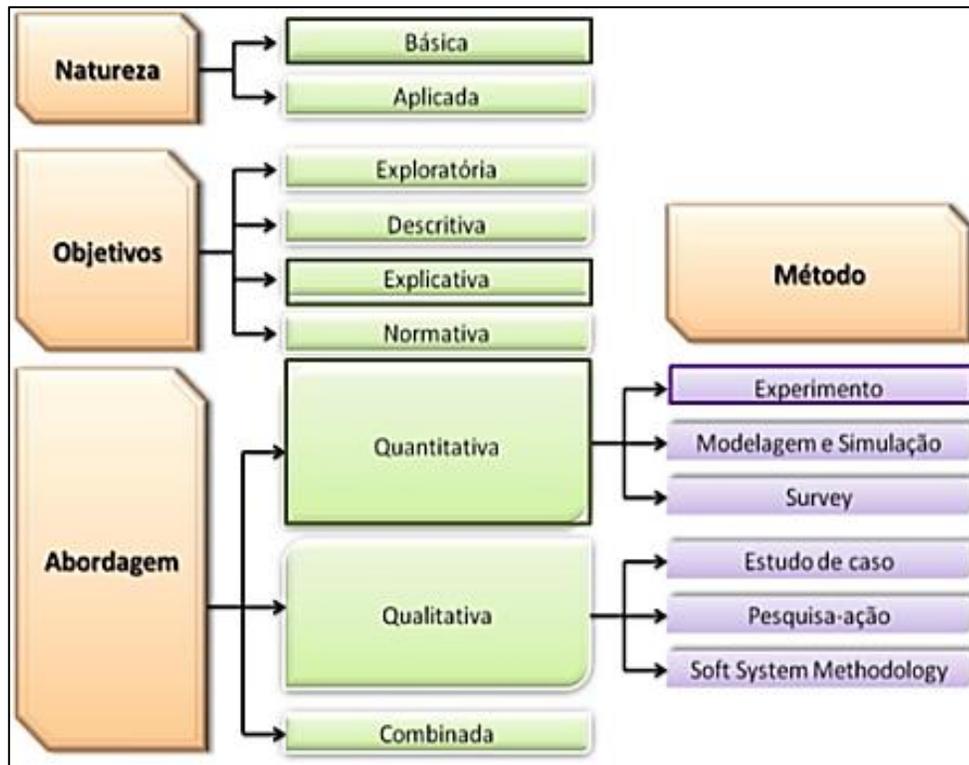


Figura 3-1 Classificação da pesquisa científica  
Fonte: adaptado de Miguel *et al.* (2010)

### 3.3 Definição do método de pesquisa experimental

O método 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. O método experimental empregado se justifica, pois segundo Bryman (1989), a pesquisa experimental 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 os experimentos genuínos 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**

Esta dissertação 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 no tipo de dados, optou-se pela análise de concordância GR&R atributos através dos coeficientes de Fleiss' Kappa e Kendall.

#### **3.4.1 Justificativa da escolha dos índices estatísticos para a análise do FMEA**

A escolha dos indicadores dessa pesquisa se justifica através do embasamento apresentado no Capítulo 2.6.5 e também do ponto de vista prático, pois permitir obter conclusões sobre a concordância dos especialistas quanto ao FMEA a partir de duas perspectivas diferentes, pois se diferem em relação ao tipo de concordância avaliada.

Essa diferença entre os indicadores de Kendall e de Fleiss' Kappa consiste em que, para o segundo, 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 e exigir que o sistema se comporte sem variação das notas atribuídas, o que não ocorre em algumas etapas do FMEA e não permite que o cálculo do coeficiente ou simplesmente ser muito pequeno não converge a resultados significativos. 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. Dessa maneira, 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 se justifica porque quando se tem dados em escala ordinal, 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 a 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.

Além disso, 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 temos mais referências sobre estes índices, bem como estão mais bem detalhados do ponto de vista estatístico.

### 3.4.2 Desenvolvimento da análise estatística

Todos os cálculos deste trabalho foram desenvolvidos por meio do software “Minitab® *Statistical Software*” (versão 16.1.0, Copyright © 2010, Mintab Inc., USA) e suas bibliotecas de análise de repetitividade e reprodutividade de GR&R por atributos.

A Figura 3-2 traz a ilustração do roteiro do desenvolvimento da análise estatística que essa pesquisa utilizou como metodologia. De acordo com a Figura 3-2 e suas etapas, a análise estatística inicia-se pela observação da significância dos indicadores de concordância escolhidos. Os coeficientes de Fleiss' Kappa e Kendall são analisados através da investigação do P-valor, Chi-Quadrado (Chi-Qd) de cada experimento e o Chi-Quadrado<sub>Crítico</sub>.

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  $\alpha$  (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 da Tabela 4-1 Classificação do índice de Fleiss' Kappa” e Tabela 4-2 Faixas de aceitabilidade do índice de Kendall” apresentadas na seção de Classificação do FMEA no Capítulo 4.1.

A Tabela 4-1 de referência para classificação do FMEA para o índice de Fleiss' Kappa foi adaptada do trabalho de Landis e Koch (1977). A Tabela 4-2 para o índice de Kendall é uma proposta desta dissertação e foi desenvolvida com o intuito de definir os níveis de aceitabilidade do FMEA sendo, portanto, mais uma contribuição científica do trabalho.

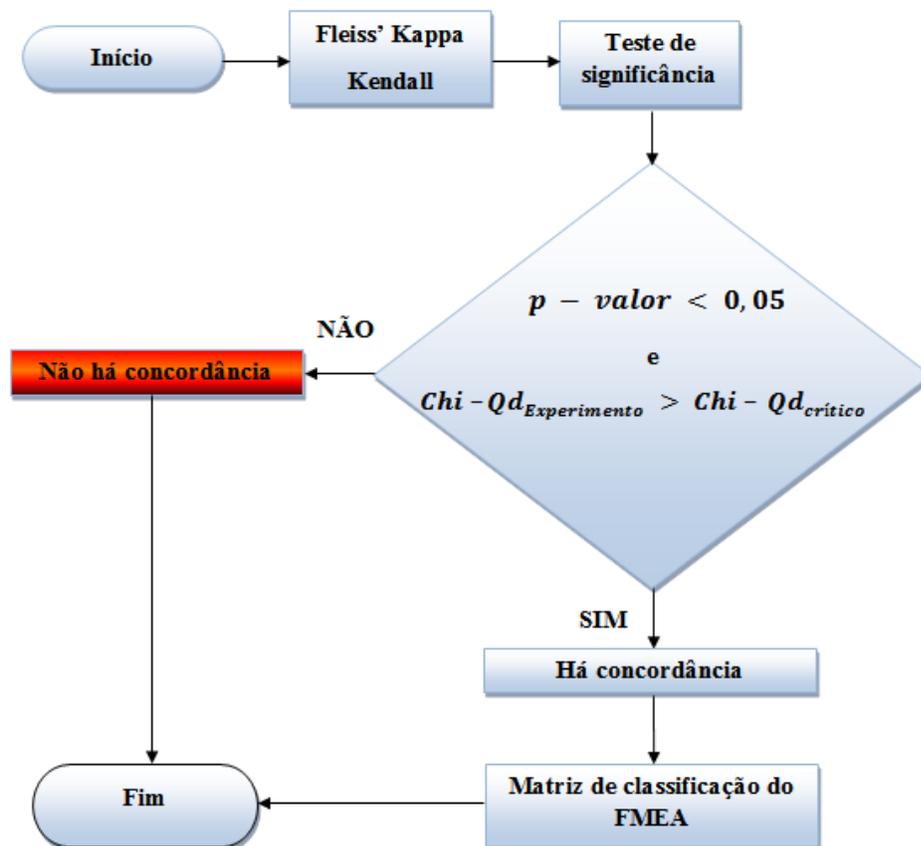


Figura 3-2 Fluxograma da análise estatística do FMEA

### 3.5 Desenvolvimento da análise da pesquisa

O desenvolvimento da análise da pesquisa deste trabalho está dividido em dois casos apresentados no Capítulo 4.2 e no Capítulo 4.3. O Caso 1 é a análise de um FMEA experimental modificado e desenvolvido para se realizar a análise de concordância por atributos na Repetitividade e Reprodutividade (GR&R) do FMEA. O Caso 2 é um FMEA extraído da

literatura, cujos autores realizaram um FMEA tradicional e outro FMEA aliado com a ferramenta Fuzzy, chamado de Fuzzy-FMEA. Este estudo do Caso 2 tem o objetivo de comparar a eficiência dos dois tipos de FMEA e verificar qual é mais eficiente do ponto de vista da análise de concordância.

Por fim, a última fase do desenvolvimento da análise da pesquisa é a conclusão do estudo proposto nesta obra, presente no Capítulo 5. A subjetividade do FMEA pode ser constatada a partir das análises de concordância aplicadas aos Casos 1 e 2. O FMEA foi classificado frente aos resultados dos coeficientes de Fleiss' Kappa e de Kendall calculados nas etapas anteriores baseados na tabela de classificação de Fleiss' Kappa e na matriz proposta para o indicador de Kendall.

Com todas essas fases é possível caracterizar a confiabilidade e a cientificidade da ferramenta qualitativa FMEA.

### **3.6 Considerações finais**

Esta dissertação visa trazer contribuições científicas relevantes sobre o FMEA e seu desenvolvimento no que tange a parte mais importante da ferramenta, que é a definição das prioridades de riscos via conceituação de seus modos de falha.

Vale a pena ressaltar que pela primeira vez o desenvolvimento de um FMEA real, voltado ao estudo da análise de GR&R por atributo dos especialistas que atribuem as suas notas é realizado. Além disso, esses conceitos também foram estendidos para o Fuzzy-FMEA para analisar se existe subjetividade nesse sistema integrado e verificar seu nível de classificação.

Nos próximos capítulos os dois casos relatados anteriormente serão detalhados e discutidos, de acordo com o desenvolvimento descrito neste capítulo.

## 4. APLICAÇÃO DE ANÁLISE DE CONCORDÂNCIA AO FMEA

### 4.1 Classificação do FMEA

Este capítulo é dedicado a apresentação das Matrizes de classificação do FMEA. 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 2.6.4 e justificado no Capítulo 3.4.1, os indicadores escolhidos para avaliar a subjetividade do FMEA são 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. No entanto, 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 o Caso 1 e Caso 2 presente nos Capítulos 4.2 e 4.3, respectivamente.

#### 4.1.1 Matriz de classificação Fleiss' Kappa

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)

O coeficiente de Fleiss' Kappa é um dos instrumentos de análise de concordância cujas faixas de 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 com relação a análise do índice de Fleiss' Kappa dos índices de prioridade de risco, conforme apresentado na Tabela 4-1.

Essa tabela de classificação é referência para índices significativos de Fleiss' Kappa, ou seja, são significativos desde que estes índices calculados apresentem  $p - valor < 0,05$ . Caso contrário, os dados analisados apontam que não há concordância entre as avaliações e, portanto, o sistema é classificado como “não há concordância das avaliações”.

#### 4.1.2 Desenvolvimento da classificação por Kendall

Sobre o coeficiente de concordância W de Kendall que foi essencialmente aplicado ao objeto de estudo desta dissertação 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 Montgomery e Runger, 2003; Kendall e Babington-Smith, 1939; Friedman, 1940; Kendall, 1948a; Siegel, 1956; Fleiss, 1971 e Landis e Koch, 1977. 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 com relação ao índice de Kendall.

### 4.1.3 Matriz de classificação Kendall

A matriz de classificação do FMEA através do indicador de concordância de Kendall está apresentada na Tabela 4-2. A classificação é a referência para índices significativos de  $W$  Kendall, isto é, estes índices calculados devem apresentar  $p - valor < 0,05$  e  $Chi - Qd > Chi - Qd_{crítico}$ . Mas, devido a importância da ferramenta FMEA para a tomada de decisão dentro das empresas, também optou-se 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 podemos 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

<b>Classificação do FMEA</b>	<b>Kendall</b>
Inaceitável	Kendall não Significativo
Péssimo	$0 < Kendall < 0,20$
Atenção – Revisão	$0,21 < Kendall < 0,40$
Considerável	$0,41 < Kendall < 0,60$
Bom	$0,61 < Kendall < 0,90$
Excelente	$Kendall > 0,91$

Então, a partir de índices significativos de  $W$  de Kendall, um FMEA pode ser classificado estatisticamente (vide Tabela 4-2) como Péssimo, onde sugerimos que deva ser rejeitado; Atenção-Revisão, onde 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 FMEA, 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, onde o FMEA é aceito plenamente.

## 4.2 CASO 1- Estudo experimental

Nesta parte do trabalho, Caso 1, realizou-se uma pesquisa experimental a respeito do FMEA na empresa Mahle. O experimento foi planejado para avaliar a variabilidade existente entre diferentes especialistas e entre os diferentes modos de falhas durante o processo de elaboração do FMEA. Para isto, desenvolveu-se um FMEA que possibilitasse avaliar essa variabilidade dos avaliadores através da análise de repetitividade e reprodutividade (GR&R).

### 4.2.1 Desenvolvimento do FMEA

Para desenvolver o estudo para análise do sistema de medição no FMEA a sua realização foi modificada. Nesse experimento utilizou-se três especialistas que analisaram 5 conjuntos de modos de falha/efeito/causa com três repetições, que implicam em três FMEA's necessariamente com a mesma abordagem. Essa combinação gerou 15 análises para cada um dos especialistas, divididos em três FMEA's.

Com relação ao conteúdo do FMEA não houve alterações, isto é, um FMEA de processo foi preparado visando a análise de confiabilidade em ambiente distorcido em relação aos problemas durante o processo de uma metalúrgica. O objetivo do FMEA é classificar os modos de falha mais críticos do processo de metalização por plasma.

Existem vários modos de falha para este processo, porém, para esse experimento, foram selecionados apenas cinco destes, contendo apenas um efeito e causa para que o modo de falha ocorra com seus respectivos métodos de controle conforme o Anexo A, desenvolvido por um grupo de especialistas com domínio e experiência nesse processo.

Após a preparação do FMEA, foram selecionados os especialistas para pontuar os modos de falha quanto a severidade, ocorrência e detecção. Dentre o grupo de especialista, os seguintes colaboradores foram selecionados para formar o equipe de avaliadores do FMEA:

- 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.

De maneira homogênea, buscou-se construir um equipe de especialista que fosse abrangente e com perspectivas diferentes, que pudessem classificar o FMEA a partir de diferentes pontos de vista do processo de metalização por plasma.

#### 4.2.2 Coleta dos dados do experimento

O FMEA planejado tem no total tem 45 experimentos para analisá-lo como sistema de medição, com relação aos índices de Severidade, Ocorrência, Detecção e índice de prioridade de risco (RPN). A ordem dos modos de falha foi aleatorizada.

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, onde a Tabela 4-3 é o resultado do primeiro FMEA realizado, a Tabela 4-4 apresenta o segundo FMEA e a Tabela 4-5 apresenta o último experimento FMEA.

Tabela 4-3 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 4-4 FMEA Experimental 2

Modo de falha	Avaliador	Índice de Risco			RPN
		Severidade	Ocorrência	Deteccão	
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 4-5 FMEA Experimental 3

Modo de falha	Avaliador	Índice de Risco			RPN
		Severidade	Ocorrência	Deteccão	
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

### 4.2.3 Análise dos dados

Foram analisadas 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

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 equipe de avaliadores entre eles (*Between*).

#### 4.2.3.1 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.

##### 4.2.3.1.1 Análise de Concordância entre observador (*Within*)

A análise de concordância entre observador pode ser observada através do *Run Chart* exibido na Figura 4-1 Gráfico de pontuações para a Severidade, que apresenta os resultados das avaliações para a severidade para cada modo de falha, por cada um dos especialistas em suas três repetições.

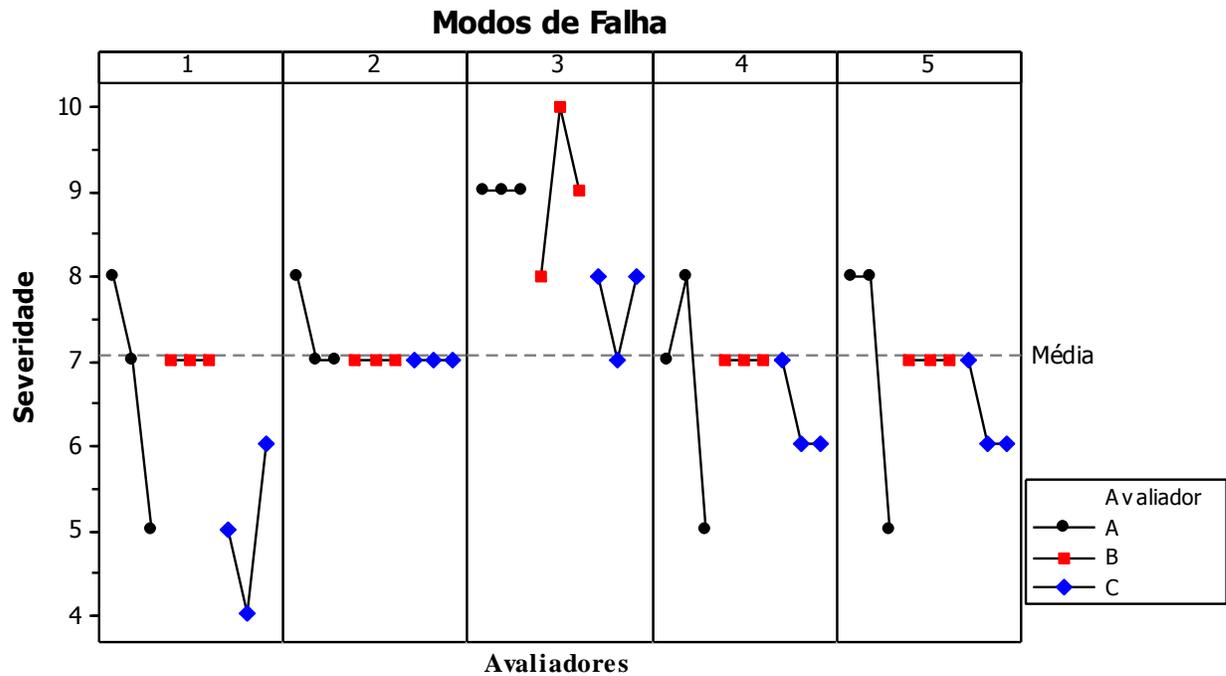


Figura 4-1 Gráfico de pontuações para a Severidade

Através desse gráfico, pode-se observar que o engenheiro de processos (B) obteve uma variabilidade menor durante o processo de pontuação, enquanto que os outros dois operadores A e C, tiveram maior variação de suas pontuações para um mesmo modo de falha. Em síntese, a análise da Figura 4-1 permite concluir ainda que as pontuações dos modos de falha pelos especialistas A e C, têm grandes variações, comparado ao especialista B, que obteve menor variabilidade.

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 variabilidade 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 4-6 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, através do software estatístico Minitab®16, dos avaliadores consigo mesmo (*Within*), estão apresentados na Tabela

4-6. Essa análise estatística preliminar é a porcentagem de concordância das três avaliações aleatórias realizadas pelos avaliadores. Então, como podemos observar na Tabela 4-6, o avaliador B foi o que obteve melhor desempenho, onde suas resposta 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 4-2 traz as informações anteriores e ilustra o nível de concordância entre avaliador dentro do intervalo de confiança de 95%.

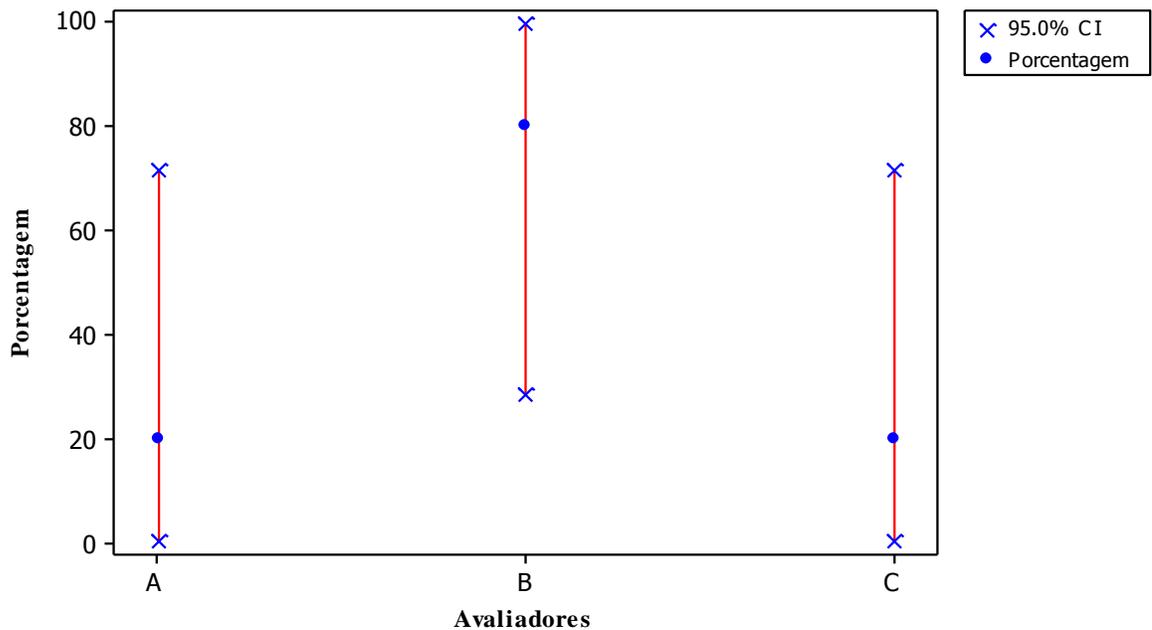


Figura 4-2 Nível de concordância entre avaliador para a Severidade

A estatística de concordância de Fleiss' Kappa foi calculada para o índice de severidade e está presente na Tabela 4-7. Vale lembrar, que o coeficiente de Fleiss' Kappa por ser uma análise 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, podemos conferir a partir na Tabela 4-7 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 os cálculos observamos que todos os avaliadores tiveram dificuldades em atribuir as notas durante os experimentos de classificação. Realizando a análise individual do desempenho dos especialistas, notamos que o avaliador A, bem como o C não alcançaram nível

significativo do coeficiente de Fleiss' Kappa global. Como podemos conferir na Tabela 4-7, para o especialista A o  $p - valor = 0,2621$  e para o C  $p - valor = 0,1743$ , isto é, para ambos  $p - valor > 0,05$ . Então o sistema de avaliação do especialista A e B só pode ser classificado, segundo a Tabela 4-1, de acordo com o Capítulo 4.1.1, que não há concordância destes dois especialistas durante o processo de análise de repetitividade do seu desempenho.

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 4-7 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	*	*	*	*	
	<b>Global</b>	<b>0,0964</b>	<b>0,151332</b>	<b>0,63692</b>	<b>0,2621</b>	
	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	
<b>Global</b>		<b>0,4231</b>	<b>0,1737</b>	<b>2,4354</b>	<b>0,0074</b>	
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	*	*	*	*	
	<b>Global</b>	<b>0,1456</b>	<b>0,1553</b>	<b>0,9372</b>	<b>0,1743</b>	

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

Para ser capaz de conhecer a destreza de repetitividade dos especialistas entre avaliador, também utilizou-se o coeficiente de concordância de Kendall. Esse coeficiente tem variação de 0 a 1, cujos valores mais próximos de 1 expressam concordância absoluta do avaliador e o oposto, próximos de 0, representam a falta de concordância, conforme detalhado no Capítulo 2.6.5.2.4 de revisão da literatura.

Seguindo a ordem apresentada na metodologia para o desenvolvimento da pesquisa, a fim de examinar o índice de Kendall, também devemos investigar o grau de significância do mesmo. Para tanto, como descrito na Seção 3.4.2 deste presente trabalho, devemos levar 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  $\text{Chi - quadrado}_{\text{crítico}} (X^2) = 9,4877$ .

Tabela 4-8 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

Observando a Tabela 4-8 o analista A apresenta  $\text{Chi - quadrado}_{\text{Severidade}} < \text{Chi - quadrado}_{\text{crítico}}$ , em outras palavras, o índice de Kendall de 0,6533 obtido não é considerado significativo e com isso não apresenta concordância do avaliador A 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  $\text{Chi - Qd} > \text{Chi - Qd}_{\text{crítico}}$ . De acordo com os cálculos detalhados acima, sobre a análise de concordância entre avaliador, podemos dizer que não são uniformes. Com exceção apenas do analista de qualidade (avaliador A), o engenheiro de processos (avaliador B) e o engenheiro industrial (avaliador C) concordaram consigo mesmo.

Agora, analisando-se o índice de Kendall para a severidade, de acordo com a Tabela 4-2 de classificação do FMEA por Kendall, temos que o avaliador C alcançou o nível de aceitabilidade do seu FMEA como Bom, com índice de *Kendall* = 0,8800. O especialista B atingiu o máximo coeficiente, obtendo-se o valor *Kendall* = 1, que expressa total concordância durante o processo experimental de avaliação dele consigo mesmo (*Within*) que classifica o seu FMEA como Excelente e o analista A teve seu desempenho classificado como FMEA Inaceitável com relação a análise de repetitividade da avaliação da severidade.

Mesmo assim, do ponto de vista da análise do sistema de medição do índice de severidade, podemos dizer que o procedimento de avaliação deve ser discutido para a padronização das avaliações e juízos dos especialistas. Isso porque os especialistas A e C deveriam receber treinamentos para melhorarem os seus critérios adotados, em especial o analista A, que não conseguiu repetir suas análises nos três experimentos realizados.

#### 4.2.3.1.2 Análise de Concordância dentre os observadores (*Between*)

A análise de concordância dentre os observadores (*Between*) tem o objetivo de analisar o grau de concordância dos especialistas uns com os outros de maneira geral. O resultado é quantificar o FMEA quanto a confiabilidade das avaliações no geral, tendenciosidade dos avaliadores e classificar o FMEA estatisticamente através do índice de concordância de Fleiss' Kappa e Kendall para se obter informações sobre a subjetividade da ferramenta.

Tabela 4-9 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.

A Tabela 4-9 apresenta que em nenhuma das avaliações os especialistas concordaram na sua totalidade uns com os outros, portando a porcentagem de combinações é 0%.

Observando a Tabela 4-10 a seguir, podemos ver que o P-valor  $< 0,05$ , ou seja, o coeficiente de Fleiss' Kappa apresenta significância e os especialistas concordam entre eles.

Tabela 4-10 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
<b>Global</b>	<b>0,0717</b>	<b>0,0396</b>	<b>1,8077</b>	<b>0,0353</b>

No entanto, ainda segundo a Tabela 4-10, temos *Fleiss' Kappa* = 0,0718 que 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 obtemos  $\text{Chi - quadrado}_{\text{Severidade}} (X^2) = 26,4615$ , isto é,  $\text{Chi - quadrado}_{\text{Severidade}} > \text{Chi - Qd}_{\text{crítico}}$ .

Tabela 4-11 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 4-11, 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, podemos 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 concordaram. Assim, podemos dizer que o FMEA tomado em conjunto para a análise da severidade dos modos de falha é estatisticamente Bom.

#### **4.2.3.2 Ocorrência**

A análise do FMEA por GR&R atributo segue através da análise de Ocorrência dos modos de falha.

##### **4.2.3.2.1 Análise de Concordância entre observador (*Within*)**

Para a análise de Concordância temos que na Figura 4-3 o gráfico *Run Chart* da atribuição dos graus de ocorrência para o FMEA pelos especialistas durante os três processos de avaliação do FMEA.

Devemos 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.

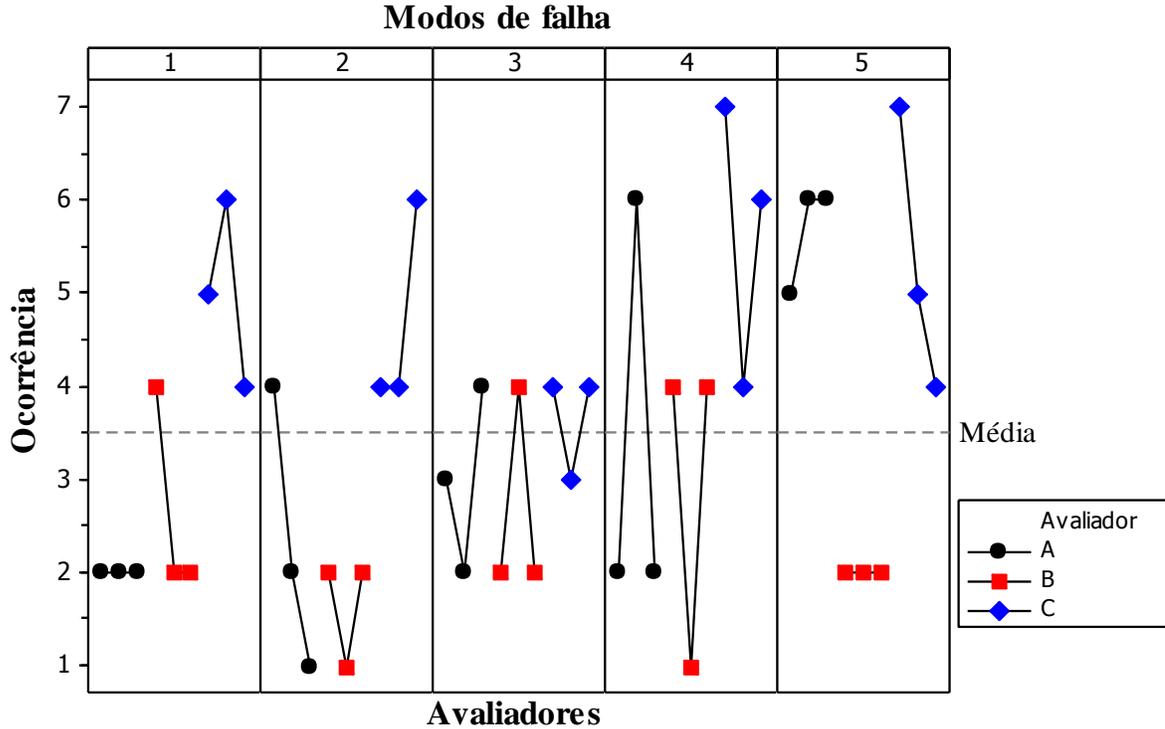


Figura 4-3 Gráfico de atribuição das notas para Ocorrência

A partir da Figura 4-3 podemos observar que os avaliadores tiveram mudanças de opinião ao longo das semanas do experimento. A variação de opiniões também pode ser examinada por meio da Tabela 4-12.

Tabela 4-12 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 4-4, a respeito do nível de concordância entre avaliador considerando o intervalo de confiança.

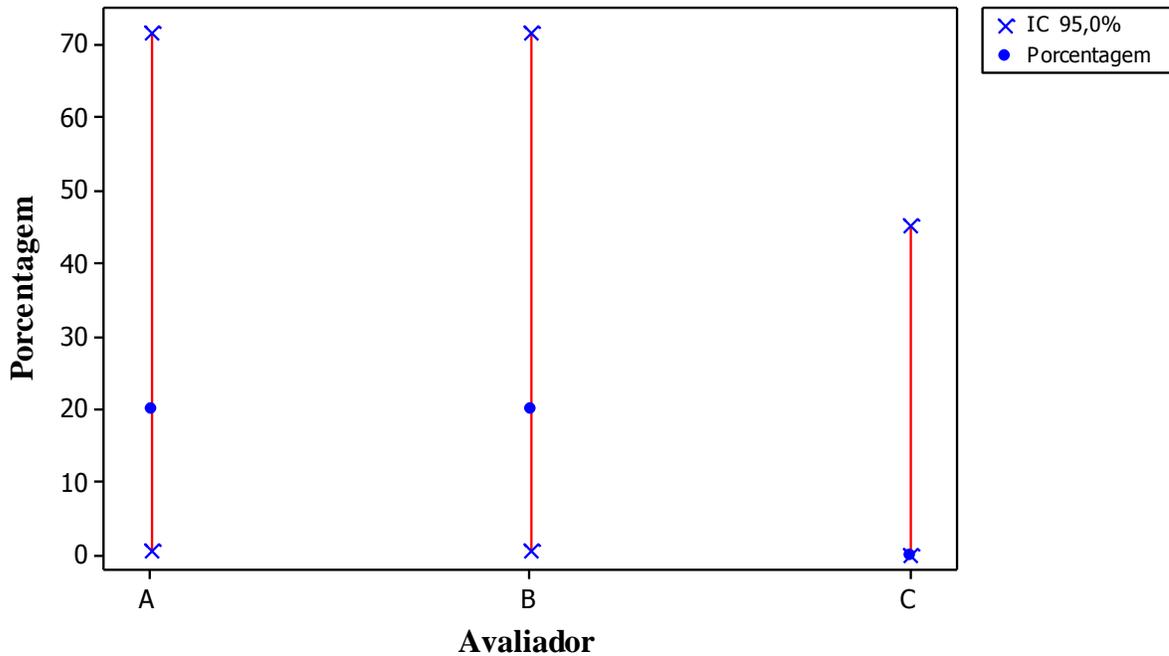


Figura 4-4 Nível de concordância entre avaliador para Ocorrência

Tabela 4-13 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Ocorrência (*Within*)

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	*	*	*	*
	<b>Global</b>	<b>0,0625</b>	<b>0,1390</b>	<b>0,4496</b>	<b>0,3265</b>
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	*	*	*	*
		<b>Global</b>	<b>0,0322</b>	<b>0,1963</b>	<b>0,1642</b>
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
	<b>Global</b>	<b>-0,2342</b>	<b>0,1457</b>	<b>-1,6067</b>	<b>0,9459</b>

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

Na Tabela 4-13 temos 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. Ainda sobre essa Tabela, podemos ver 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, de acordo com a matriz de classificação (vide Capítulo 4.1.1).

Com relação a análise da concordância entre observador pelo índice de Kendall, temos os resultados apresentados na Tabela 4-14 a seguir:

Tabela 4-14 Coeficiente de Kendall para a Ocorrência (*Within*)

<b>Avaliador</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Chi - QdOcorrência</b>	<b>DF</b>	<b>P-valor</b>
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 que o Chi – quadrado<sub>crítico</sub> ( $X^2$ ) = 9,4877A e observando a Tabela 4-14, podemos conferir 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*), podemos verificar que nenhum especialista atingiu o nível satisfatório. O analista de qualidade (A) alcançou  $Kendall = 0,5475$ , o engenheiro de processos  $Kendall = 0,2558$  e o engenheiro industrial  $Kendall = 0,3846$ , que não são significativos estatisticamente, o que classifica o FMEA dos especialistas segundo a Tabela 4-2 como Inaceitável.

Deste modo, observando os resultados da análise dos especialistas com suas próprias opiniões para a ocorrência, pode-se conferir que nenhum deles manteve as notas atribuídas ao FMEA ao longo dos três experimentos realizados. 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.

#### 4.2.3.2.2 **Análise de Concordância dentre os observadores (*Between*)**

Dando continuidade ao exame por MSA, analisou-se também o nível de concordância dentre os observadores (*Between*) com o objetivo de investigar se ao menos houve concordância

dos especialistas uns com os outros para conferir a confiabilidade do FMEA através dos índices de Fleiss' Kappa e Kendall.

A Tabela 4-15 demonstra que não houve concordância geral dos avaliadores, cujas opiniões não combinaram em nenhum dos modos de falha.

Tabela 4-15 Concordância observadores para a Ocorrência (*Between*)

<b>Avaliações</b>	<b># Combinadas</b>	<b>Porcentagem</b>	<b>95% IC</b>
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 neste FMEA, como se pode conferir na tabela anterior, a porcentagem de combinações é de 0% entre eles. Isso significa que eles têm conceitos diferentes para os mesmos problemas, o que envia o resultado do FMEA.

A Tabela 4-16 a seguir apresenta a estatística de Fleiss' Kappa e podemos 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 4-16 Coeficiente de Fleiss' Kappa para a Ocorrência (*Between*)

<b>Resposta</b>	<b>Kappa</b>	<b>SE Kappa</b>	<b>Z</b>	<b>P - Valor</b>
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
<b>Geral</b>	<b>-0,0386</b>	<b>0,0385</b>	<b>-1,0047</b>	<b>0,8425</b>

Com o índice de concordância Fleiss' Kappa é possível dizer que não houve concordância entre os avaliadores com relação aos atributos adotados. O Fleiss' Kappa não é significativo e classifica o FMEA, segundo o Capítulo 4.1.1, como não há concordância Fleiss' Kappa.

A análise do coeficiente de concordância de Kendall é mostrada na Tabela 4-17. Como podemos ver o  $P - valor = 0,2556$ , isso nos indica que esse coeficiente não é significativo. Além disso, mais uma vez temos que para o  $Chi - quadrado_{crítico} (X^2) = 9,4877A$  e observando a Tabela 4-17 abaixo, podemos constatar que  $Chi - Qd_{ocorrência} < Chi - Qd_{crítico}$ , para o conjunto com todos os avaliadores na análise por GR&R por atributos.

Então, de fato o índice de Kendall calculado não é significativo para nenhum dos três especialistas.

Tabela 4-17 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's realizados.

Talvez 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 do equipe.

### 4.2.3.3 Detecção

A detecção dos modos de falha do FMEA 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.

#### 4.2.3.3.1 Análise de Concordância entre observador (*Within*)

A Figura 4-5 exhibe a distribuição das notas de detecção para o FMEA pelos especialistas durante os três processos de avaliação do FMEA.

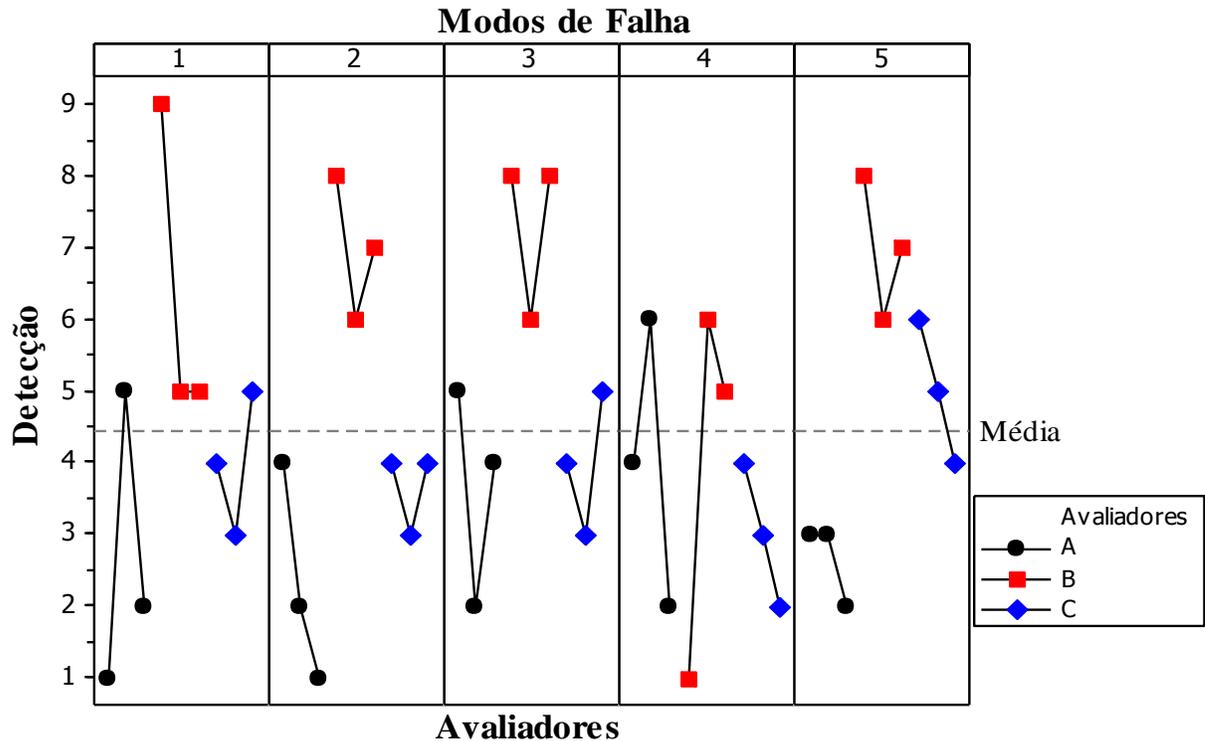


Figura 4-5 Gráfico de atribuição das notas para Detecção

Dessa figura podemos observar que os operadores mudaram de opinião no decorrer dos FMEA's aplicados. Essa alteração de conceitos também pode ser arguida através da Tabela 4-18 a seguir:

Tabela 4-18 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 realizaram sobre o nível de detecção dos modos de falha.

A Figura 4-6 a seguir também explicita que não combinaram as opiniões dos operadores (0%) dentro do intervalo de confiança de 95%.

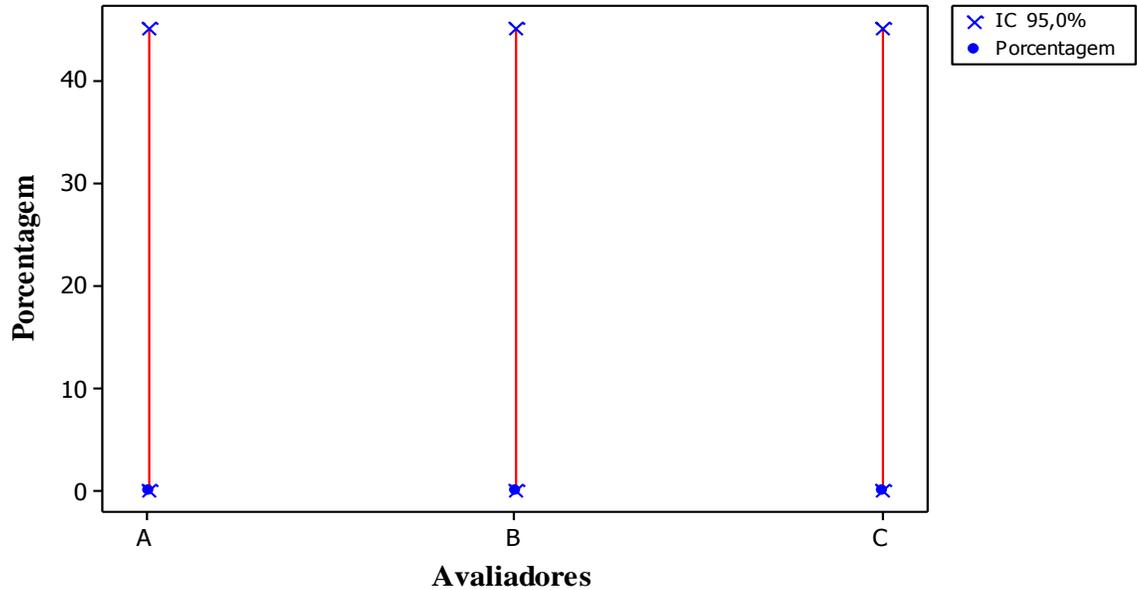


Figura 4-6 Nível de concordância entre avaliador para Detecção

Na Tabela 4-19 adiante temos a análise do coeficiente 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 por meio dessa análise estatística.

Então, durante os três experimentos, os graus atribuídos foram muito diferentes, cujos variam demasiadamente entre os especialistas segundo o valor calculado de Fleiss' Kappa e de acordo com a Figura 4-5 do *Run Chart*. Essa variação imprime caráter de subjetividade nas das avaliações, uma vez que a não há uniformidade das notas para os mesmo modos de falha avaliados durante as três vezes por cada especialista. Dessa maneira, a classificação do FMEA com relação a análise do índice Fleiss' Kappa é, de acordo com o Capítulo 4.1.1, de que não há concordância das avaliações. Além disso, ainda a fim de constatar a falta de concordância entre observador, analisou-se também o índice de Kendall. Observando a Tabela 4-20, vemos que o indicador W de Kendall calculado não é significativo, ou seja, o  $P - valor > 0,05$  para cada um dos especialistas.

Não obstante, também realizou-se o cálculo do Chi – quadrado<sub>crítico</sub> ( $X^2$ ) = 9,4877 e da Tabela 4-20, podemos comprovar que  $Chi - Qd_{Detecção} < Chi - Q_{crítico}$ , para todos os

avaliadores na análise GR&R atributo. De fato, o índice de Kendall calculado não é significativo para nenhum dos três especialistas.

Tabela 4-19 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	*	*	*	*
	9	*	*	*	*
	<b>Global</b>	<b>-0,1797</b>	<b>0,1254</b>	<b>-1,4335</b>	<b>0,9242</b>
B	1	-0,0714	0,2581	-0,2766	0,6090
	2	*	*	*	*
	3	*	*	*	*
	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
	<b>Global</b>	<b>-0,0955</b>	<b>0,1284</b>	<b>-0,7438</b>	<b>0,7715</b>
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	*	*	*	*
	9	*	*	*	*
	<b>Global</b>	<b>-0,2963</b>	<b>0,1501</b>	<b>-1,9734</b>	<b>0,9758</b>

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

Tabela 4-20 Coeficiente de Kendall para Detecção (*Within*)

Avaliador	Coeficiente	Chi- $Qd_{\text{Detecção}}$	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 (A) alcançou  $Kendall = 0,2901$ , o engenheiro de processos  $Kendall = 0,2954$  e o engenheiro industrial  $Kendall = 0,4211$ . Porém, todos esses índices são insignificantes e classificam o FMEA como Inaceitável, que mais uma vez podemos considerar que está abaixo do desejável para uma ferramenta importante como o FMEA.

Esses resultados e as análises apontam para divergências das opiniões ao longo dos FMEA's realizados e demonstraram a subjetividade da opinião dos especialistas que não utilizam o mesmo critério para a atribuição das notas aos modos de falha consigo mesmo.

As classificações não foram adequadamente empregadas quando repetido o processo. Ainda podemos 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.

Alternativas para correção e solução para esse problema da subjetividade no FMEA serão discutidas na seção de conclusão deste Caso 1.

#### 4.2.3.3.2 **Análise de Concordância dentre os observadores (*Between*)**

A análise de concordância dentre (*Between*) os avaliadores desta seção exibe que não houve concordância dos conceitos entre eles. As suas opiniões não foram as mesmas para nenhum dos modos de falha analisados.

Tabela 4-21 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 porcentagem de combinações entre os especialistas é de 0%, como pode-se observar na Tabela 4-21. Esse resultado significa que durante a atribuição das notas de detecção os três especialistas divergiram suas opiniões.

A Tabela 4-22 a seguir apresenta a estatística de Fleiss' Kappa, que retrata a análise de concordância por atributo de cada item pelas notas empregadas. No entanto, 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 4-22 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
<b>Global</b>	<b>-0,0527</b>	<b>0,0294</b>	<b>-1,7876</b>	<b>0,9631</b>

O coeficiente de concordância de Kendall, apresentado na Tabela 4-23 a seguir, 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  $Kendall = 0,1160$ . No entanto, esse índice não é significativo, pois  $P - valor > 0,05$ , bem como para o experimento temos  $Chi - Qd_{Detecção} < Chi - Qd_{crítico}$ .

Tabela 4-23 Coeficiente de Kendall para Detecção (*Between*)

Coeficiente	Chi-Qd <sub>Detecção</sub>	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 calculado para o FMEA é classificado como Inaceitável. Com esses resultados, podemos dizer que o FMEA realizado com relação ao índice de detecção está longe do aceitável para um sistema onde os jurados devem concordar entre si.

Mais uma vez, o FMEA realizado está estatisticamente sob suspeita para índice detecção. Segundo a análise de GR&R atributos, com o coeficiente de concordância de  $Kendall = 0,1160$  não significativo, há grande disparidade de opiniões e conceitos que foram adotados pelo engenheiro de processos, analista de qualidade e o engenheiro industrial durante o desenvolvimento do FMEA de processo estudado nesse capítulo.

#### 4.2.3.4 RPN – Número de Prioridade de Risco

A análise MSA aplicada ao FMEA por GR&R atributo termina com a verificação do último índice, o mais importante deles que é produto dos índices de severidade, ocorrência e

detecção: o RPN. Apesar dos resultados dos índices apresentados anteriormente não serem satisfatórios do ponto de vista do MSA recomendado pela literatura e classificação proposta, nesta seção iremos verificar se, apesar das disparidades anteriores, ao menos o produto dos modos de falha são estatisticamente aceitáveis.

Essa hipótese surgiu, sabendo 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.

#### 4.2.3.4.1 **Análise de Concordância entre observador (*Within*)**

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

Então, de maneira análoga, temos os mesmo procedimentos de cálculo estatístico anterior, com o intuito de verificar se o RPN é o suficiente para classificar e priorizar os modos de falha que estão sob julgamento dos especialistas.

Inicialmente temos na Figura 4-7 o *Run Chart* que exhibe o RPN resultante para o FMEA desenvolvido pelos especialistas. Devemos observar que a escala é maior, pois pode variar de 1 a 1000, que é o número de combinações dos índices  $SxDxO$ .

Assim, considerando essas informações, podemos conferir que durante os três processos de avaliação os modos de falha, os RPN's calculados tiveram grande variação para todos os

especialistas. Os valores dos RPN's gerados pelos três avaliadores é praticamente aleatório se examinarmos a Figura 4-7 e Figura 4-8.

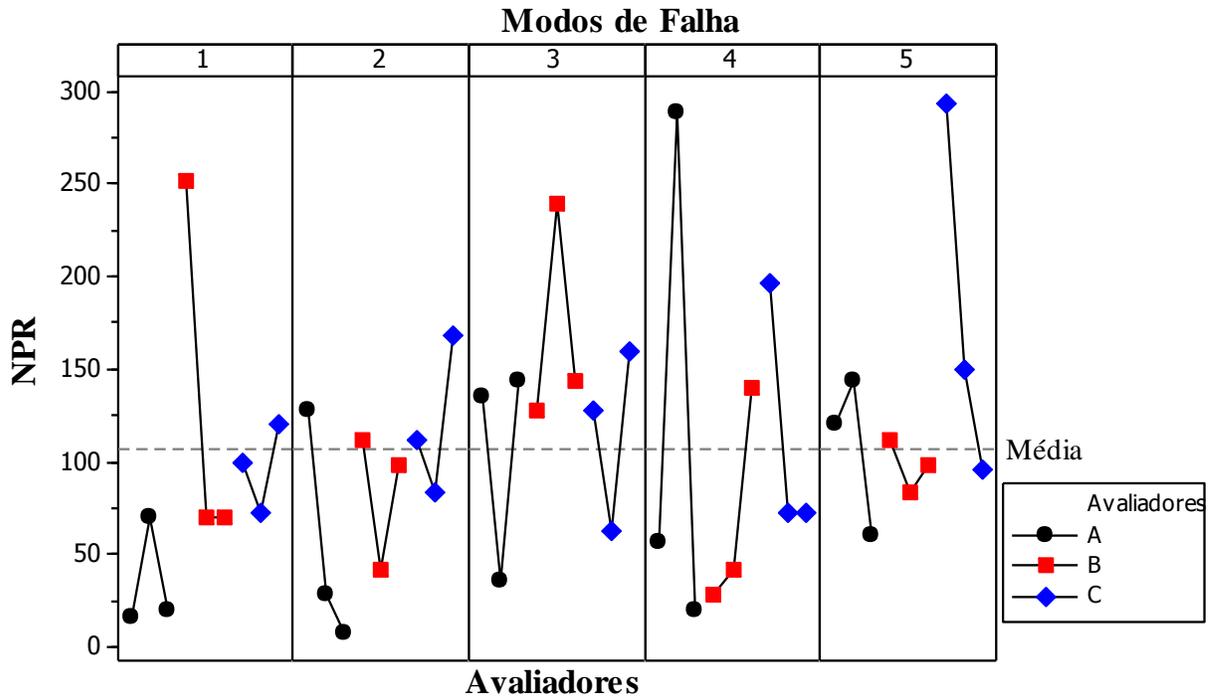


Figura 4-7 Gráfico do produto RPN

Podemos observar ainda que os avaliadores pouco concordam em termos do RPN, pois a disparidade dos resultados foi ainda mais ampliada pelo produto. Os avaliadores A, B e C não combinaram em nenhum dos RPN's nos três experimentos realizados, como mostra a Tabela 4-24 a seguir:

Tabela 4-24 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 4-8.

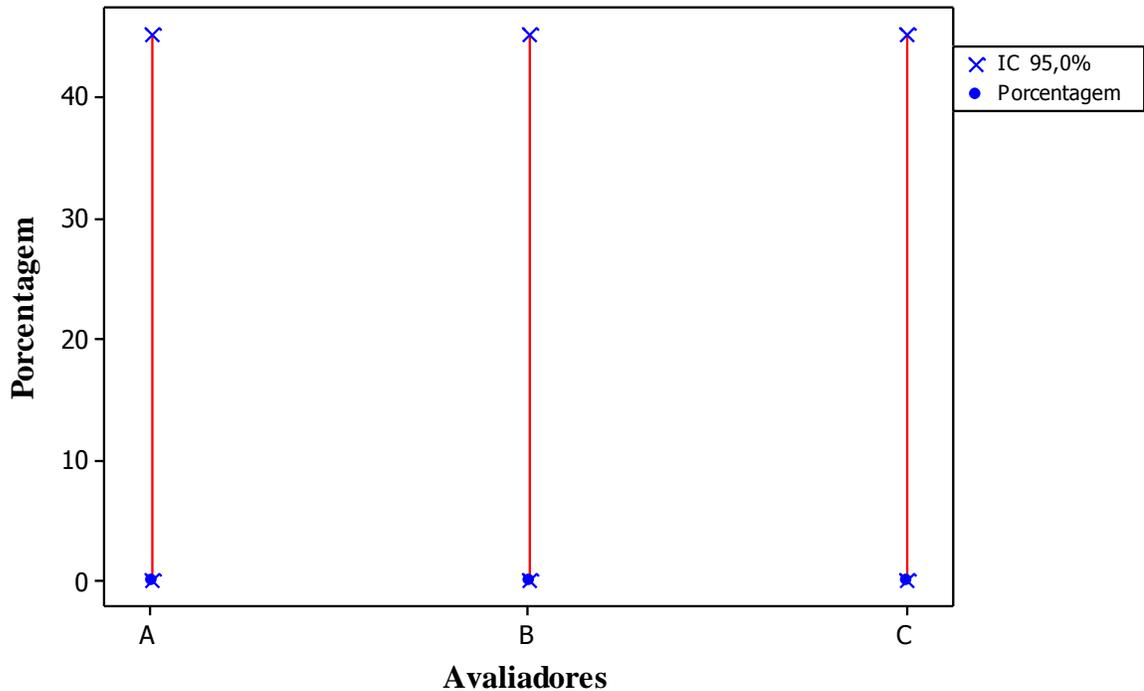


Figura 4-8 Nível de concordância entre avaliador para RPN (*Within*)

O cálculo do índice de Fleiss' Kappa não foi significativo para nenhum dos três avaliadores, pois  $p - valor > 0,05$ , ou seja, não há concordância.

Para a análise da concordância entre observador o índice de Kendall calculado está apresentado na a Tabela 4-26.

Tabela 4-25 Coeficiente de Fleiss' Kappa para RPN (*Within*)

Resposta	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

Tabela 4-26 Coeficiente de Kendall para RPN (*Within*)

Avaliador	Coeficiente	Chi - Qd <sub>RPN</sub>	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 temos  $DF = 4$  e  $\alpha = 0,05$ , ou seja, o Chi – quadrado<sub>crítico</sub> ( $X^2$ ) = 9,4877. Comparando-se com os dados apresentados na Tabela 4-26 acima, podemos observar 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 os cálculos de concordância dos índices anteriores, podíamos prever que RPN também não fosse significativo para nenhum dos três especialistas, pois não concordaram consigo mesmos enquanto atribuíram as notas da detecção e ocorrência para os modos de falha.

Podemos concluir que os RPN's gerados colocam estatisticamente o FMEA como Inaceitável (vide Tabela 4-2).

Com a análise do RPN, sem dúvida a falta de concordância dos avaliadores consigo mesmo é expressiva e deve ser levada em consideração para a análise dos modos e efeitos de falha que serão priorizados.

#### 4.2.3.4.2 Análise de Concordância dentre os observadores (*Between*)

A seguir, temos a parte final da análise do FMEA por MSA. Examinou-se o nível de concordância dentre os observadores (*Between*), com o objetivo de investigar se, de fato se existe concordância dos especialistas uns com os outros. Aqui, ainda podemos ter concordância geral ou, verificar se o erro de concordância apresentado anteriormente causou um erro acumulado que se propagou ainda mais no resultado do RPN.

Então, por meio da Tabela 4-27 conferimos que não houve concordância geral dos avaliadores. A suas opiniões não combinaram em nenhum dos modos de falha para os RPN's gerados durante o FMEA em termos percentual.

Tabela 4-27 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.

Ainda podemos inferir da tabela anterior que a porcentagem de combinações é de 0%, o 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 significativo, uma vez que  $p - valor > 0,05$ .

Tabela 4-28 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 a seguir:

Tabela 4-29 Coeficiente de Kendall para RPN (*Between*)

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

Assim como na análise anterior, para a o RPN também temos Chi – quadrado<sub>crítico</sub> ( $X^2$ ) = 9,4877. Da Tabela 4-29, podemos conferir que  $Chi - Qd_{RPN} < Chi - Qd_{crítico}$  e  $p - valor > 0,05$ , o que permite concluir que as avaliações realizadas pelo conjunto dos três especialistas que gerou o índice de prioridade de risco não é significativa.

O coeficiente de concordância de Kendall entre observadores, para o produto dos índices severidade, ocorrência e detecção, ou seja, o RPN é  $Kendall = 0,1568$ , mas que não é significativo e é classificado como Inaceitável.

Como foi possível prever ao longo de toda a análise desenvolvida até aqui, os especialistas não concordaram entre si no processo de atribuição das notas e também o resultado final do FMEA não tem anuência de opiniões. Esse índice de Kendall permite concluir que o FMEA realizado não é confiável do ponto de vista estatístico devido à falta de concordância entre os observadores e assim podemos dizer que é subjetivo.

#### 4.2.4 Conclusões do método Experimental

Para realizar a análise do sistema de medição com o FMEA, desenvolveu-se o FMEA que foi apresentado nesta seção chamado de Caso 1. O seu desenvolvimento foi modificado para que fosse possível avaliar a variabilidade das avaliações dos especialistas e examinar a destreza de repetitividade e reprodutibilidade deles. Os seus índices de severidade, ocorrência, detecção e RPN, foram estudados quanto ao nível de concordância dos três especialistas escolhidos através da análise dos coeficientes de concordância de Fleiss' Kappa e de Kendall.

O desenvolvimento da análise do Caso 1 foi dividido em duas partes: a primeira voltada para a análise individual relacionada à repetitividade dos especialistas consigo mesmos (*Within*) e a segunda voltada para a análise do desempenho coletivo do equipe de avaliadores tomados em conjunto (*Between*). Os resultados obtidos dessas análises de GR&R por atributos nos permitiram

obter informações sobre a subjetividade da ferramenta FMEA durante o processo de atribuição de suas notas.

Da avaliação dos avaliadores consigo mesmos, podemos 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.

Além disso, a análise de repetitividade para a Ocorrência, Detecção e RPN não foram satisfatórias. Para todos os especialistas e em todas as avaliações consigo mesmo destes índices 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.

Para a análise de concordância do equipe de avaliadores tomada em conjunto (*Betwenn*), o objetivo é investigar a habilidade de reprodutividade dos especialistas. Para o índice de Severidade, a análise de concordância do FMEA com relação ao 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 classificaram o FMEA como não há concordância das avaliações, Inaceitável e novamente não há concordância das avaliações, respectivamente. Tanto com 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 repetitividade e reprodutividade do FMEA permite concluir que os especialistas atribuíram as notas ao FMEA de maneira aleatória, comprovado pelos índices de concordância de Fleiss' Kappa e Kendall apresentado nesta seção. Isto quer dizer que o FMEA estudado no Caso 1, estatisticamente deve ser invalidado e a classificação dos seus modos de falha não permite que se tome alguma decisão e sejam

classificados, 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 dúvidas 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 *GR&R* 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 a análise por *GR&R* atributos, que permitiu examinar a habilidade dos especialistas quanto a sua repetitividade e reprodutividade.

Portanto, podemos fazer uma extensão dos problemas levantados nesse trabalho a outros FMEA's e destacar mais uma de suas vulnerabilidades: a subjetividade do FMEA. Podemos destacar 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 *GR&R* do FMEA.

### 4.3 CASO 2 - Estudo dos dados da literatura

Para este estudo de Caso 2 do FMEA 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), que é o FMEA aliado aos conceitos de lógica difusa (Fuzzy) e análise por multi-atributos para tomada de decisão. A proposta do artigo é de introduzir o FMEA na engenharia naval e concomitantemente superar as deficiências do método tradicional FMEA, através da utilização integrada das ferramentas Fuzzy-FMEA. Esses conhecimentos, como apresentado no Capítulo 2, já foram utilizados como alternativa para solucionar alguns dos problemas do FMEA em vários trabalhos de engenharia conforme detalhado no Capítulo 2.4.11.1.

Neste presente capítulo utilizaremos o banco de dados do trabalho de Helvacioğlu e Ozen (2014) para examinar estatisticamente o sistema de medição por meio de análise de concordância do FMEA tradicional e do Fuzzy-FMEA para inferir sobre o fator subjetividade do FMEA, ou seja, investigar se a técnica Fuzzy-FMEA reduz a subjetividade do processo de atribuição de notas do FMEA.

Para isso, nos próximos Capítulos 4.3.5 e 4.3.6, são apresentados em detalhes a análise por GR&R atributo do FMEA tradicional e do Fuzzy-FMEA, que foram divididos em duas seções para o Caso 2. 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 com relação à subjetividade do FMEA.

#### 4.3.1 Descrição dos dados

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

### 4.3.2 FMEA tradicional

*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 na Tabela 4-31 e o resultado RPN na Tabela 4-30.

Tabela 4-30 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)

### 4.3.3 Fuzzy - FMEA

*A posteriori*, no trabalho de Helvacioğlu e Ozen (2014), após observarem as deficiências do FMEA tradicional, especialmente durante a classificação e em termos do RPN, o método Fuzzy-FMEA foi considerado. Baseado no trabalho de Olcer e Odabasi (2005), 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 objetivo dessa abordagem pelo método integrado com Fuzzy era de simplesmente comparar as classificações a partir do FMEA tradicional e do Fuzzy-FMEA.

Nessa dissertação, iremos utilizar somente as informações relevantes à análise do Fuzzy-FMEA 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 dissertação.

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

#### 4.3.4 Desenvolvimento da análise

A análise do sistema de medição do FMEA tradicional e do Fuzzy-FMEA deste Caso 2 foi realizada de forma análoga a condução descrita no Capítulo 4.2.3, utilizando o software Minitab® 16 e suas bibliotecas de MSA. Novamente, para investigar a concordância utilizou-se como estatística os índices de Fleiss' Kappa e 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.

Ao contrário do estudado no Caso 1, neste Caso 2 só foi possível desenvolver a análise estatística da equipe de especialistas tomados em conjunto (*Between*), pois as avaliações não tiveram repetição para que fosse possível analisar a habilidade de repetitividade (*Within*).

Para o FMEA tradicional a análise de concordância foi aplicada em cada um dos índices (severidade, ocorrência, detecção e RPN). Para o sistema Fuzzy-FMEA a análise de concordância teve a limitação de analisar somente o RPN, pois a lógica Fuzzy envolve diversas etapas como entrada de dados, fuzzificação, inferência e Defuzzificação. Por isso é possível aplicar a metodologia de análise de concordância somente com números defuzzificados, nesse caso, o RPN.

Nos próximos capítulos temos a análise de concordância do FMEA tradicional e do Fuzzy-FMEA em detalhes, bem como as discussões e conclusões sobre os resultados.

Tabela 4-31 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
<b>1</b>	8	2	3	8	2	3	7	2	3	8	2	3	8	2	3	7	2	3
<b>1A</b>	5	3	3	5	2	3	5	2	3	4	3	3	4	4	3	4	3	3
<b>2</b>	8	2	3	7	2	3	7	2	3	7	2	4	7	2	3	7	2	3
<b>2A</b>	8	3	4	8	2	3	8	3	3	7	4	3	8	2	3	8	3	3
<b>3</b>	8	3	3	8	3	4	8	2	3	7	4	4	7	3	3	7	3	3
<b>3A</b>	8	3	3	8	3	3	8	3	3	8	3	3	6	5	3	6	3	3
<b>3B</b>	8	3	3	8	3	3	7	4	4	7	2	3	8	3	3	8	3	3
<b>4</b>	6	6	3	7	4	4	7	2	3	7	2	3	6	5	3	5	3	3
<b>5</b>	7	4	3	7	3	3	7	3	3	8	3	3	7	4	3	6	4	3
<b>6</b>	7	4	3	6	2	3	6	2	3	6	2	3	6	2	3	6	2	4
<b>6A</b>	7	3	4	7	2	3	7	2	3	7	2	3	7	3	3	6	4	4
<b>7</b>	5	3	3	6	2	3	6	2	3	6	2	3	6	3	3	6	3	3
<b>7A</b>	6	3	3	6	2	3	6	2	3	6	2	3	6	3	3	6	2	3
<b>8</b>	7	5	3	8	4	4	8	4	3	7	4	4	8	4	3	7	2	4
<b>8A</b>	6	6	3	8	3	3	8	3	3	7	4	3	8	3	3	8	3	3
<b>8B</b>	7	5	3	7	3	3	7	4	3	6	3	4	4	4	4	6	4	3
<b>9</b>	5	4	3	7	2	3	7	2	3	7	2	3	7	3	3	7	2	3
<b>10</b>	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)

Tabela 4-32 Tabela de atributo de classificação Fuzzy – FMEA

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)

### 4.3.5 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 da equipe de especialistas quanto ao FMEA realizado. As quatro variáveis respostas consideradas são a Severidade, Ocorrência, Detecção e o RPN.

A seguir são apresentadas as análises para cada um dos índices do FMEA tradicional.

#### 4.3.5.1 Severidade

A análise da severidade inicia-se com a Tabela 4-33, que exhibe o número de avaliações combinadas pelos seis especialistas, isto é, o número de avaliações cuja opinião foi a mesma para todos os avaliadores para um mesmo modo de falha. Dessa Tabela 4-33 podemos 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 4-33 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 4-34 a seguir apresenta a análise dos especialistas através do coeficiente de Fleiss' Kappa. Para o experimento  $p\text{-valor} < 0,05$ , então o índice de Fleiss é significativo. A partir disso, o índice de global é Fleiss' Kappa = 0,3445 o que classifica o FMEA quanto a análise de severidade como Considerável.

Tabela 4-34 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
<b>Global</b>	<b>0,3450</b>	<b>0,0370</b>	<b>9,3043</b>	<b>0,0000</b>

A análise do coeficiente de concordância de Kendall é exibida na Tabela 4-35 de onde podemos 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 Chi –

$\text{quadrado}_{\text{Severidade}} > \text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{crítico}}$  e  $p - \text{valor} < 0,05$ , ou seja, os seis especialistas concordam a respeito do índice severidade atribuídos aos modos de falha.

Tabela 4-35 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 Boa, 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.

#### 4.3.5.2 Ocorrência

Para a avaliação da ocorrência sobre os modos de falha, podemos observar através da Tabela 4-36 que duas combinações das avaliações de um total de 18 modos de falha foram obtidas, ou seja, 11,11%.

Tabela 4-36 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  $p - \text{valor} < 0,05$ . 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 4-37 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
<b>Global</b>	<b>0,1886</b>	<b>0,0402</b>	<b>4,6847</b>	<b>0,0000</b>

A investigação do coeficiente de Kendall também apresenta  $\text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{crítico}} (X^2) = 27,5871$ , e comparando com o cálculo experimental temos

$\text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{Ocorrência}} > \text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{crítico}}$  e  $p - \text{valor} < 0,05$ . Então, o índice é significativo e os especialistas concordam entre si.

Tabela 4-38 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, observamos o índice de Kendall = 0,5313, onde segundo a Tabela 4-2, a classificação do FMEA é Considerável para a concordância. Essa classificação está abaixo do desejado (Kendall > 0,60) e podemos dizer que o FMEA tradicional está estatisticamente comprometido com relação ao índice de Ocorrência.

### 4.3.5.3 Detecção

Para a detecção dos modos de falha o número de combinações foi de 9 dos 18 modos de falha avaliados (vide Tabela 4-39), 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 4-39 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.

No entanto, a análise de detectabilidade dos modos de falha, de acordo com o cálculo da estatística de Fleiss' Kappa, não foi significativa, pois  $p - \text{valor} < 0,05$ , como podemos ver na Tabela 4-40. Segundo o índice de Fleiss' Kappa a concordância do FMEA é classificada como sem concordância das avaliações.

Tabela 4-40 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
<b>Global</b>	<b>0,0410</b>	<b>0,0573</b>	<b>0,7164</b>	<b>0,2369</b>

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

Tabela 4-41 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, com relação a detecção, como Inaceitável. Como exposto no Capítulo 2.6.5.2.3, sobre o cálculo do coeficiente de Kendall, os empates nas avaliações para o calculo para Kendall deve ser acrescido de um termo que corrige esse índice no sentido de aumentar a concordância e que, mesmo assim, apesar das avaliações terem sido apenas notas 3 e 4, o índice de Kendall ainda está abaixo do desejado.

#### 4.3.5.4 RPN

O RPN do FMEA extraído da literatura também foi analisado em termos da concordância. Como exhibe a Tabela 4-42 abaixo, dos 18 produtos (*SxOxD*) de todos os modos de falha gerados pela avaliação dos índices de risco pelos seis avaliadores, em nenhuma delas o RPN foi igual.

Tabela 4-42 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 podemos conferir na Tabela 4-43. Com Fleiss' Kappa = 0,1884, o RPN do FMEA realizado no estudo de Helvacioğlu e Ozen (2014) é classificado com concordância Leve.

Tabela 4-43 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
<b>Global</b>	<b>0,1884</b>	<b>0,0201</b>	<b>9,3431</b>	<b>0,0000</b>

Analisando a Tabela 4-44 a seguir, sobre a investigação do coeficiente de Kendall, temos para os dados apresentados que  $\text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{crítico}} (X^2) = 27,5871$  e  $\text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{RPN}} = 68,5529$ , bem como  $p - \text{valor} < 0,05$ . Assim, comparando-se os termos tem-se  $\text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{crítico}} < \text{Chi} - \text{quadrado}_{\text{RPN}}$  e com isso, podemos considerar o coeficiente de concordância de Kendall como significativo, ou seja, existe evidência de que os especialistas concordam entre si.

Conforme expõe a Tabela 4-44 o coeficiente de concordância de Kendall = 0,6724 aponta para que o FMEA seja classificado como Bom no quesito RPN.

Tabela 4-44 Coeficiente de Kendall para o RPN

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

Então, entendendo as análises desta seção como o resultado final do FMEA tradicional, podemos dizer que ele apresenta concordância estatística do produto das avaliações de severidade, ocorrência e detecção pelos observadores. Segundo o índice de Kendall significativo, podemos classificar o FMEA como Bom.

#### 4.3.5.5 Análise de todas as avaliações

Como análise suplementar, consideramos relevante investigar também todos os atributos tomados de uma única vez, isto é, a análise conjunta de Reprodutividade de todos os

modos de falha avaliados pelos seis especialistas, para cada um dos índices de severidade, ocorrência e detecção.

Este subcapítulo de análise somente foi inserido para a análise do FMEA tradicional do Caso 2, pois não há repetitividade como no Caso 1, onde não teríamos um resultado prático ao analisar um conjunto com réplicas, pois o FMEA real não contém repetições, porém, para o FMEA sem repetição pode ser considerado.

Então, esse conjunto apresenta mais dados do que a análise isolada dos índices de prioridades realizadas anteriormente, pois temos aqui um total de 54 avaliações para cada um dos especialistas, que é a soma da avaliação dos 18 modos nas três vezes para cada índice de prioridade (S, O e D). Analisando-se esse banco de informações, podemos conferir na Tabela 4-45 que de todas as 54 observações, combinou-se 12 delas, um percentual de relevante de 22,22% .

Tabela 4-45 Análise de Concordância para todas observações

Avaliações	#Combinadas	Porcentagem	95% IC
54	12	22,22	(12,04, 35,60)

# Combinadas: todos os avaliadores concordam uns com os outros.

O índice de Fleiss' Kappa da Tabela 4-46 apresenta que a análise de todos os índices do FMEA tem o coeficiente significativo com  $p - valor < 0,05$ . Assim, com Fleiss' Kappa = 0,4667, a análise é considerada com nível de concordância Moderado.

Tabela 4-46 Coeficiente de Fleiss' Kappa para todas as observações

Resposta	Kappa	SE Kappa	Z	P - Valor
2	0,5476	0,0351	15,5867	0,0000
3	0,5791	0,0351	16,4816	0,0000
4	0,1273	0,0351	3,6252	0,0001
5	0,0919	0,0351	2,6176	0,0044
6	0,5232	0,0351	14,8915	0,0000
7	0,4461	0,0351	12,6978	0,0000
8	0,5399	0,0351	15,3675	0,0000
Global	0,4667	0,0168	27,7786	0,0000

A partir da Tabela 4-47, podemos realizar a análise do coeficiente de Kendall que possui  $DF = 53$  e  $\alpha = 0,05$ , cujo  $Chi - quadrado_{crítico} (X^2) = 70,9935$ ,  $Chi - quadrado_{Todos\ os\ índices} = 270,2270$  e  $p - valor < 0,05$ . Assim, observamos que  $Chi - quadrado_{crítico} < Chi - quadrado_{Todos\ os\ índices}$  e podemos afirmar que o coeficiente de

concordância de Kendall é significativo, ou seja, existe evidência de que os especialistas concordam entre si.

Tabela 4-47 Coeficiente de Kendall para todos componentes Caso 2

Coeficiente de Kendall	Chi - Qd	DF	P
0,8498	270,227	53	0,0000

Observando novamente a Tabela 4-47 o coeficiente de Kendall = 0,8498 está próximo do desejado que é Kendall > 0,90 para se atingir o nível de Excelente. Dessa maneira, segundo a Tabela 4-2, a análise estatística de todos os índices tomados em conjunto classifica o FMEA como Bom com relação a concordância entre os especialistas para a análise de todas as avaliações realizadas.

Além disso, ainda vale a pena ressaltar que o coeficiente de Kendall = 0,8498 obtido por esta análise em conjunto é surpreendentemente alto. Sabendo que nem todas as análises até o momento apresentaram índices de concordância com esse valor, para a análise em conjunto, esperava-se que o índice fosse mais baixo, o que não aconteceu. Isso pode ser explicado pelo fato do FMEA ter sido realizado por especialistas experientes que têm opiniões homogêneas no geral, isto é, opiniões consistentes e que no conjunto total de observações dos modos de falha pelos especialistas do FMEA tradicional tem Boa concordância.

#### 4.3.5.6 Conclusões do 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 Bom, para as avaliações da Severidade, do RPN e também para a Avaliação de todas as avaliações tomadas em conjunto; já com relação à Ocorrência, a classificação foi Considerável e a única exceção de classificação foi FMEA Inaceitável para a Detecção. Considerando como classificação absoluta para o FMEA tradicional de Helvacioğlu e Ozen (2014) a análise do RPN por Kendall, podemos dizer que o FMEA é classificado como Bom quanto a concordância das avaliações dos especialistas.

Além de permitir classificar o FMEA, podemos dizer que esses resultados nos alertam sobre o desempenho de especialistas avaliando o FMEA tradicional. A partir do estudado nesta seção, podemos 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. A contribuição dessas análises também sugere que os modos de falha não estão bem definidos e/ou os critérios adotados precisam ser discutidos para que o FMEA alcance o seu objetivo, cujo é priorizar os riscos mais relevantes para a organização.

#### **4.3.6 Análise dos Resultados: Fuzzy - FMEA**

A análise do Fuzzy-FMEA através de GR&R por atributos também está baseada no artigo de Helvacioğlu e Ozen (2014), discorrido na seção introdutória anterior, Seção 4.3. O objetivo deste estudo é de investigar, classificar e comparar se essa metodologia Fuzzy-FMEA é melhor do que o FMEA tradicional no que tange a análise de concordância e subjetividade das avaliações dos analistas.

A análise MSA por atributos desses dados está detalhada nos próximos capítulos desta seção, com as etapas do tratamento dos dados, desenvolvimento da análise, Defuzzificação, a análise de concordância junto ao Fuzzy-FMEA e as conclusões.

##### **4.3.6.1 Desenvolvimento da Análise**

A análise do Fuzzy-FMEA desenvolvida neste trabalho teve que abordar duas técnicas diferentes: a lógica Fuzzy e a análise de concordância. Essas são metodologias utilizadas separadamente, mas sua integração ainda não havia sido empregada em conjunto anteriormente, segundo pesquisas nas principais bases de dados: Web of Science e ISI.

Para que fosse possível realizar as análises do sistema Fuzzy-FMEA por GR&R atributos os dados extraídos do trabalho de Helvacioğlu e Ozen (2014) tiveram que ser tratados por causa da limitação do tipo de dados que são gerados pela lógica Fuzzy, cujos são número fuzzificados. Esses números não são parâmetros de entrada para a análise estatística por concordância.

O tratamento dos dados começa 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 fosse possível analisar o sistema Fuzzy-FMEA. A Figura 4-9 ilustra as etapas que compreendem o sistema Fuzzy-FMEA até a análise de concordância.



Figura 4-9 Etapas de análise do sistema Fuzzy – FMEA

A etapa inicial é a entrada de dados, chamados de números *crisp*, que é a tradução das opiniões dos especialistas para construir as escalas dos índices de risco como no FMEA tradicional. Essas escalas são utilizadas como base para o processo de fuzzificação, que é a construção das funções Fuzzy. No trabalho Helvacioğlu e Ozen (2014), as funções escolhidas para a Severidade e Detecção foram as triangulares e para a Ocorrência as trapezoidais. Para essas duas etapas, vide que estão discutidas em detalhes no artigo de referência de Helvacioğlu e Ozen (2014).

Na etapa de inferência, temos a tabulação das notas Fuzzy atribuídas 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)*. Essa multiplicação foi calculada segundo Kaufmann e Gupta (1991), que propõem a multiplicação Fuzzy baseada na geometria Fuzzy original dos números.

O produto dessa multiplicação são funções trapezoidais chamadas de RPN-Fuzzy, apresentadas na Tabela 4-48 e Tabela 4-49. Essas funções necessitam ser escalonadas, pois não podem ser utilizadas diretamente para estabelecer as prioridades de riscos dos modos de falha do Fuzzy-FMEA. A partir disso, essas funções escalonadas foram chamadas de saída Fuzzy e seguem para a etapa final de Defuzzificação.

Tabela 4-48 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 4-49 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 Defuzzificação tem o objetivo de transformar as funções Fuzzy obtidas em números em Reais, ou seja, retorná-los a condição inicial de números *crisp*. Essa operação de dados foi desenvolvida através do software MATLAB® e suas bibliotecas de cálculo e

controle Fuzzy. O método de Defuzzificação escolhido foi o por centroide (centro de gravidade) que é a abordagem mais utilizada para obter números *crisp* consistentes (WANG *et al.*, 2009).

Por fim, temos na Tabela 4-50 a nota defuzzificada do método Fuzzy-FMEA que cada um dos seis especialistas atribuiu para cada modo de falha. Esses dados finalmente podem ser utilizados para análise de concordância que será desenvolvida por meio do software Minitab®.

Tabela 4-50 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

#### 4.3.6.2 Análise de concordância aplicada ao Fuzzy-FMEA

Devido a limitações do método Fuzzy-FMEA 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 Fuzzy que só deve ser defuzzificado após as operações aritméticas, detalhadas no Capítulo 4.3.4 anterior, para então investigar a concordância.

A Tabela 4-51 exibe o número de combinação das avaliações dos especialistas utilizando o método Fuzzy. De todas as avaliações dos 18 modos de falha, apenas em um deles todos os seis especialistas concordaram exatamente, ou seja, 5,56%.

Tabela 4-51 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 4-52 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 quer aponta que o sistema apresenta concordância estatística. Observando o índice de Fleiss' Kappa global = 0,1867, temos que a concordância dos avaliadores com relação ao FMEA é Leve, conforme estabelecido na Tabela 4-1.

Tabela 4-52 Coeficiente de Fleiss' Kappa para o Fuzzy-FMEA

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
<b>Global</b>	<b>0,1804</b>	<b>0,0226</b>	<b>7,9543</b>	<b>0,0000</b>

Em seguida, realizou-se a análise do coeficiente de Kendall. A partir da Tabela 4-53, considerando  $DF = 17$  e  $\alpha = 0,05$ , o sistema Fuzzy-FMEA apresenta  $Chi - quadrado_{crítico} (X^2) = 27,5871$ ,  $Chi - quadrado_{Fuzzy-FMEA} = 36,3144$  e  $p - valor < 0,05$ . Assim, temos que  $Chi - quadrado_{Fuzzy-FMEA} > Chi - quadrado_{crítico}$  e, portanto, pode-se concluir que o coeficiente de concordância de Kendall é significativo, pois existe evidência de que os especialistas concordam entre si.

Ainda analisando-se a Tabela 4-53 temos que o coeficiente de concordância de Kendall = 0,3560. Com esse valor o FMEA é classificado como em estado de Atenção –

Revisão, segundo a Tabela 4-2 definida. O sistema Fuzzy-FMEA está com o coeficiente de Kendall abaixo do desejado que é  $Kendall > 0,6001$  para ser considerado aceitavelmente Bom.

Tabela 4-53 Coeficiente de Kendall para o Fuzzy-FMEA

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

Segundo a análise estatística desta seção, a metodologia Fuzzy-FMEA apresenta concordância entre os avaliadores significativa 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 de consistência que espera que deva-se 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.

#### 4.3.6.3 Conclusões sobre o Fuzzy-FMEA

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 Fuzzy-FMEA ao invés do FMEA tradicional, pois fornece diversos benefícios conforme apresentado no Capítulo 2.4.11.1 de revisão do estado da arte, esta seção da pesquisa buscou analisar se de fato o Fuzzy-FMEA 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 Fuzzy-FMEA, podemos constatar mais uma vez que o FMEA é uma ferramenta subjetiva e que esse é um dos pontos fracos do FMEA. O sistema Fuzzy 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 apresenta concordância Leve e através do índice de Kendall permite concluir que o FMEA está em estado de Atenção e deve ser revisto.

Algumas hipóteses podem ser levantadas a respeito das divergências encontradas na avaliação dos especialistas. Talvez, se devem ao fato dos avaliadores não conseguirem distinguir entre os diferentes níveis de classificação de maneira objetiva do Fuzzy-FMEA, isto

é, os avaliadores não conseguem avaliar corretamente por não partirem dos mesmos princípios dos outros avaliadores ou não terem referência de utilização da escala.

Os resultados calculados comprometem a confiabilidade e a qualidade do Fuzzy-FMEA quanto a subjetividade, que comparada com o método FMEA tradicional, não apresentou melhorias. 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 subjetivo.

## 5. CONCLUSÕES

Esta dissertação abordou a Análise dos Modos e Efeitos de Falha (FMEA) através da análise do sistema de medição por atributos por meio da investigação da repetitividade e reprodutibilidade da atribuição das notas ao FMEA. A principal contribuição desta dissertação foi investigar a subjetividade dessa ferramenta por meio da análise de concordância através dos indicadores de Fleiss' Kappa e de Kendall. Em segundo plano, esta dissertação contribuiu com o desenvolvimento de uma matriz de classificação do FMEA com faixas de aceitabilidade do índice de Kendall.

A pesquisa foi organizada em dois casos, onde o Caso 1 analisou a habilidade de repetitividade e reprodutibilidade (GR&R) dos avaliadores, bem como analisar a subjetividade do FMEA em geral, através de um FMEA experimental modificado. O Caso 2 analisou o FMEA a partir de dados da literatura, onde foi investigado um FMEA tradicional e um Fuzzy-FMEA, a fim de comparar a eficiência em termos de consistência dessas duas abordagens.

Para o Caso 1, a análise dos resultados apresenta que a avaliação estatística de repetitividade e reprodutibilidade do FMEA experimental que permite concluir que os especialistas atribuíram as notas ao FMEA de maneira aleatória, comprovado pelos índices de concordância de Fleiss' Kappa e Kendall calculados que apontam que não há concordância das avaliações e o FMEA é Inaceitável, respectivamente classificados por meio das matrizes de classificação. Isto quer dizer que o FMEA estudado no Caso 1, estatisticamente deve ser recusado e a classificação dos seus modos de falha não permite que se tome alguma decisão e sejam ordenados por prioridade de risco. Podemos dizer ainda, que em nenhum dos casos esse índice chegou perto dos níveis aceitáveis, o que podemos considerar mais um agravante. Destes resultados do Caso 1 observamos que não há consenso, pois não houve concordância dos avaliadores entre eles e nem com eles próprios durante a atribuição das notas.

Para a análise de concordância aplicada ao Caso 2, o FMEA tradicional desenvolvido por Helvacioğlu e Ozen (2014) apresenta que a estatística de Fleiss' Kappa e Kendall classificam o FMEA como Bom para as avaliações da Severidade, do RPN e também para a Avaliação de todas as avaliações tomadas em conjunto, e com relação à Ocorrência, a classificação foi Considerável e a única exceção de classificação foi de FMEA Inaceitável para a Detecção, que indica que as percepções sobre a detectabilidade devam ser discutidas e

revisadas pelos avaliadores. A partir da análise do RPN por Kendall, podemos dizer que o FMEA é classificado como Bom quanto a concordância das avaliações dos especialistas.

Em seguida, a análise do Fuzzy-FMEA do Caso 2 por meio da análise de concordância examinada permitiu constatar mais uma vez que o FMEA é uma ferramenta subjetiva, mesmo se aliado a ferramentas como o Fuzzy. O sistema Fuzzy 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 apresenta concordância Leve e através da análise do índice de Kendall nos permite sugerir que o FMEA está em estado de Atenção e deve ser revisto. Então, os resultados calculados apontam que o Fuzzy-FMEA apresenta subjetividade e, se comparado com o método FMEA tradicional, não apresenta melhorias ou não soluciona os problemas de subjetividade.

Como é afirmado por diversos autores e discutido nessa dissertação, os atributos são subjetivos e têm diferentes níveis de importância que ficam sujeitos a interpretação dos avaliadores. Os resultados e observações desta dissertação vão de encontro com essas premissas da literatura e as reafirmam. Como constatação desses fatos, podemos dizer que a análise por GR&R atributo realizada para os Casos 1 e 2, podem auxiliar a identificar os índices de prioridade de risco que não apresentam consentimento dos avaliadores e são subjetivos, bem como classificar o FMEA quanto ao nível de concordância entre os seus avaliadores.

Além disso, baseado na subjetividade podemos destacar 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 GR&R do FMEA do Caso1, que não são avaliações consistentes. Para o Caso 2, podemos comparar o FMEA tradicional com o sistema integrado Fuzzy-FMEA e concluir que o segundo não demonstrou melhorias expressivas com relação ao nível de concordância dos seus avaliadores e, portanto, podemos afirmar que comparado os FMEA's, o FMEA tradicional ainda é a melhor ferramenta em virtude de sua simplicidade, desenvolvimento, análise e nível de concordância apresentado.

Por fim, através do estudo desenvolvido nesta pesquisa sugerimos introduzir a análise de concordância ao FMEA. Essa análise deve ser inserida como etapa final com o papel de ferramenta de confiabilidade, capaz de classificar estatisticamente o FMEA quanto a subjetividade se é Aceitável, se deve ser Revisto ou se ate mesmo é Inaceitável, através da

Tabela 4-2 Faixas de aceitabilidade do índice de Kendall” de classificação desenvolvida nesta dissertação. Com a análise de concordância ainda é possível exigir mais comprometimento da equipe, investigar e alinhar os interesses da empresa.

## 5.1 Considerações finais

Este presente trabalho levantou informações importantes sobre o FMEA que já foram questionadas em algumas fontes da literatura anteriormente, mas nunca tinham tido de fato uma pesquisa específica dedicada e que permitisse apontar e concluir sobre mais uma das suas vulnerabilidades estatisticamente: a subjetividade do FMEA.

Sobre a análise de concordância vale ressaltar que se não há concordância do FMEA entre os avaliadores, significa que a cientificidade da ferramenta é questionável. Não é possível alcançar o seu objetivo se contiver subjetividade, tendenciosidade e falta de coesão por parte dos seus especialistas. Com esta dissertação espera-se que outros pesquisadores e organizações possam se motivar para alcançar níveis de cientificidade do FMEA cada vez maiores.

Mais um dos legados desta dissertação é a capacidade de apontar que o FMEA tradicional ainda é a melhor alternativa frente a tendência presente na literatura que é a utilização do Fuzzy-FMEA. Apesar de falhar na análise de repetitividade e reprodutividade do Caso 1, o FMEA tradicional apresentou melhores resultados se comparado ao Fuzzy-FMEA do Caso 2, em virtude da simplicidade de seu desenvolvimento, análise e o nível de concordância alcançado.

Além disso, podemos dizer que outra contribuição relevante da aplicação da análise de concordância junto ao FMEA, foi permitir o desenvolvimento de uma matriz que o classifica a partir da análise do coeficiente de Kendall. Essa contribuição irá auxiliar na utilização e confiabilidade da ferramenta, bem como classificar estatisticamente o FMEA quanto a subjetividade dos avaliadores e a aceitabilidade dos resultados.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Algumas das sugestões para trabalhos futuros permeiam a limitação desta pesquisa. Nesta dissertação apenas dois casos de FMEA de processo aplicados a sistemas de engenharia

foram investigados. Sugere-se uma investigação detalhada e aplicação dos coeficientes de concordância de Fleiss' Kappa e de Kendall a outros tipos de FMEA, como o FMEA de sistema e projeto, bem como em outras áreas como automobilística, aviação e serviços, a fim de verificar o desempenho dos especialistas avaliadores e para obter conclusões que possam ser generalizadas.

A partir de todos esses fatos discutidos sobre a subjetividade do FMEA, alguns dos problemas observados durante os estudos de caso merecem destaque e são potenciais de estudo para trabalhos futuros, como:

- Estabelecer referências para padronizar a avaliação dos especialistas;
- Definir de maneira clara os critérios que serão utilizados para atribuição das notas para cada índice de prioridade;
- Fornecer treinamentos específicos aos avaliadores voltados a investigar as habilidades de repetitividade do FMEA;
- Introdução dos conceitos de GR&R por atributos aplicados ao FMEA em ensino ou formação em Engenharia da Qualidade.

As ideias deste trabalho também podem ser expandidas para mais casos de utilização do Fuzzy-FMEA, assim como aliar outras ferramentas que possam diminuir a subjetividade do FMEA testando-as através dos indicadores de concordância empregados nesta pesquisa.

## 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; **Measurement System Analysis. Reference Manual**, 3rd ed. Automotive Industry Action Group, Detroit, MI, 2010.
- AIAG; **Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) - Reference Manual**, Fourth Edition, 2008
- ALLEN, M. J.; YEN, W. M. **Introduction to Measurement Theory**. Brooks/Cole, Monterey, CA, 1979.
- ALVARADO, F. P. Análisis de concordancia de atributos. **Tecnologia em 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**, Dissertação - 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.
- BACKLUND, B.H., BONNETT, C.J., FARAGHER, J.P., HAUKOOS, J.S., KENDALL, J.L. Pilot study to determine the feasibility of training army national guard medics to perform focused cardiac ultrasonography. **Prehospital Emergency Care**, 2009..
- 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.
- BARENDIS, 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.
- BLAND, J.M., ALTMAN, D.G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. **Lancet**, 1986..
- 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.
- BURN, C.; WEIR, A. S. Using prevalence indices to aid interpretation and comparison of agreement ratings between two or more observers. **The Veterinary Journal**, v. 188, n. 2, p. 166- 170, 2011.
- CARMIGNANI, G. An integrated structural framework to cost-based FMECA: The priority-cost FMECA. **Reliability Engineering and Systems Safety**, 94, 861–871, 2009.

- 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, 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, 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, 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, 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, 2010a.
- 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, 2010b.
- 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.; 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. 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.; 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.
- CHATTOPADHYAY, S.; ACHARYA, U. R. A novel mathematical approach to diagnose premenstrual syndrome. **Journal of medical systems**, v. 36, n. 4, p. 2177–86, 2012.
- 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.
- COHEN, J. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. **Educational and Psychological Measurement**, 1960.
- CROWE, D., FEINBERG, A. Design for Reliability Approach, Development and Results. **Technical Press**, Morgan Hill, California,. FLEISS, 1981.
- 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.
- DUWE, B.; FUCHS, B.D.; HANSEN-FLASCHEN, J. Failure mode and effects analysis application to critical care medicine. **Critical Care Clinics**, v.21, n.1, p.21- 30. 2005.
- EBELING, C. **An introduction to reliability and maintainability engineering**. New York: Tata McGraw-Hill Company, 2000.
- FLEISS, J. L. Measuring Nominal Scale Agreement Among Many Raters. **Psychological Bulletin**, 1971.
- 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\*Biography\*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.
- FRIEDMAN, M. A comparison of alternative tests of significance for the problem of m rankings. **Annals Math. Statist.**, 1940..
- 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. Fuzzy inference to risk assessment on nuclear engineering systems. **Applied Soft Computing**, 7, 17–28, 2007.
- 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.; 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.

KAUFMANN, A., GUPTA, M.M.. **Introduction to Fuzzy Arithmetic Theory and Application**. Van Nostrand Rein- hold, New York, 1991.

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. **Rank and product-moment correlation**. *Biometrika*, 86, 177-193, 1949.

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.; SMITH, B. B. **The problem of m rankings**. *Ann. Math. Statist.*, 10, 275-28, 1939.

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**. Dissertação 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.
- LAVORINI, F., GERI, P., CAMICIOTTOLI, G., PISTOLESI, M., FONTANA, G.A. Agreement between two methods for assessing bioequivalence of inhaled salbutamol. **Pulmonary Pharmacology & Therapeutics**, 2007.
- 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, 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, 2013.
- 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.

- 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.
- 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 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.
- MCDERMOTT, R.E.; MIKULAK, R.J.; BEAUREGARD, M.R. The Basics of FMEA, 2nd Edition. New York,: **Productivity Press**. 2009.
- 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 goevents. **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.; RUGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers (3rd ed.)**. New York: John Wiley, 2003.
- MONTGOMERY, D.C e RUNGER, G.C **Gauge Capability e Designed Experiments. Part II: Basic Methods**. Quality Engineering, 1993b.
- MONTGOMERY, D.C e RUNGER, G.C. **Gauge Capability e Designed Experiments. Part I: Basic Methods**. Quality Engineering, 1993a.
- 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.

OLCER, A.I., ODABASI, A.Y. A new fuzzy multiple attributive group decision making methodology and its application to propulsion/manoeuvring system selection problem. **European Journal of Operational Research**. 166, 93–114, 2005..

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, 20152009.

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**. Dissertação (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., BLESA, 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.

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.

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. 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. 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. 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. 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. 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. 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. Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 22, 986–1004, 2005.
- 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.
- SILVA, A. L.; RENTES, A. F. Tornando o layout enxuto com base no conceito de mini-fábricas num ambiente de multi-produtos: um estudo de caso. **XXII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO** Curitiba (Brasil), 2002.
- 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.
- 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.
- 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.

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.

TRINKMANN, F., DOESCH, C., PAPA VASSILIU, T., WEISSMANN, J., HAGHI, D., GRUETTNER, J., SCHOENBERG, S.O., BORGGREFE, M., KADEN, J.J., SAUR, J. A novel noninvasive ultrasonic cardiac output monitor: comparison with cardiac magnetic resonance. **Clinical Cardiology**, 2010.

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.

TSAROUHAS, P.H.; ARVANITTOYANNIS, I.S.; VARZAKAS, T.H. Reliability and maintainability analysis of cheese (feta) production line in a Greek medium-size company: A case study. **Journal of Food Engineering**, v.94, n.3-4, p.233-240. 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. 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, 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.

WERKEMA, MARIA CRISTINA CATARINO. **Avaliação de Sistemas de Medição**. 1ª. Ed. Belo Horizonte: Werkema Editora, 2006.

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.; 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, 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, 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.

## ANEXO A – FMEA Caso 1

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 que o especificado	Essatura da camada menor	5	Ferramental maior que o especificado e/ou danificado	0	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)	Empripamento 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)		