

DIMAS CAMPOS DE AGUIAR

MODELO CONCEITUAL PARA A APLICAÇÃO DE FMEA DE PROCESSO NA  
INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Tese apresentada à Faculdade de  
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,  
Universidade Estadual Paulista, para a  
obtenção do título de Doutor em  
Engenharia Mecânica na área de Gestão e  
Otimização.

Orientador: Prof. Dr. Valério Antonio Pamplona Salomon

Guaratinguetá

2016

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A282m | <p>Aguiar, Dimas Campos de</p> <p>Modelo conceitual para a aplicação de FMEA de processo na indústria automotiva / Dimas Campos de Aguiar – Guaratinguetá, 2016. 135 f. : il.</p> <p>Bibliografia : f. 119-125</p> <p>Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Valério Antônio Pamplona Salomon</p> <p>1. Processo decisório por critério múltiplo 2. Controle de processo 3. Indústria automobilística I. Título</p> <p>CDU 65.012.4(043)</p> |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

***DIMAS CAMPOS AGUIAR***

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

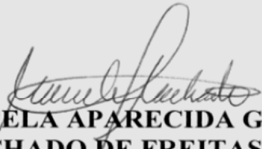
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: GESTÃO E OTIMIZAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

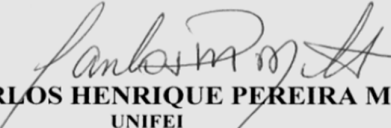
  
Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. VALÉRIO ANTONIO PAMPLONA SALOMON  
Orientador / UNESP/FEG

  
Prof.ª Dr.ª MARCELA APARECIDA GUERREIRO  
MACHADO DE FREITAS  
UNESP/FEG

  
Prof. Dr. HENRIQUE MARTINS ROCHA  
UERJ

  
Prof. Dr. CARLOS HENRIQUE PEREIRA MELLO  
UNIFEI

  
Prof. Dr. EDUARDO GOMES SALGADO  
UNIFAL/MG

Maio de 2016

## **DADOS CURRICULARES**

### **DIMAS CAMPOS DE AGUIAR**

|            |                                                                                                                                                             |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NASCIMENTO | 03.05.1977 - TAUBATÉ / SP                                                                                                                                   |
| FILIAÇÃO   | Dalmo Toledo de Aguiar<br>Celina Miriam Campos de Aguiar                                                                                                    |
| 1995/1999  | Curso de Graduação em Engenharia Mecânica na Universidade de Taubaté                                                                                        |
| 2002/2004  | Curso de Pós-Graduação em Engenharia da Qualidade, nível de Especialização, na Faculdade de Engenharia Química de Lorena.                                   |
| 2004/2007  | Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.  |
| 2012/2016  | Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista. |

de modo especial, à minha avó Bartyra de Toledo Aguiar,  
cujas lembranças serviram-me de incentivo para não  
desistir nos momentos de dificuldade.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, em especial aos meus pais *Dalmo Toledo de Aguiar* e *Celina Miriam Campos de Aguiar* pelo constante esforço ao me proporcionar boa condição de formação escolar; e à minha esposa *Renata Kelly Costa de Aguiar* pelo apoio e pela paciência nos diversos momentos.

Ao meu orientador *Prof. Dr. Valério Antonio Pamplona Salomon* que com paciência e amizade, conduziu-me à finalização deste trabalho.

Ao *Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins* pela receptividade e apoio oferecido desde meu ingresso na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

Aos familiares *Tio Coutinho*, *Tia Néia*, *Tia Fátima e Helena*, e também aos amigos de trabalho *Benedito Valério*, *Hilquias Lopes* e *Raphael Barbosa*, por terem, mesmo em meio a tantos compromissos, comparecido à defesa.

Aos amigos de trabalho *Marcos Bessa*, *Eduardo Portugal*, *Sebastião Ribeiro* e *Luciano Pinho* pelo incentivo e pelo crédito desde o início.

Aproveito ainda para deixar, novamente, minhas desculpas aos amigos e familiares pelos convites que tive que recusar em momentos que deixei de compartilhar.

## **RESUMO**

Nos últimos anos tem sido possível notar um considerável crescimento no número de empresas e pessoas que aplicam o método de Análise de Modos de Falha e Efeitos, ou FMEA, em análises de processos. Porém, em sua execução há situações de incerteza, com a possibilidade de se promover diferentes tipos de informação, gerando dúvidas se as avaliações estão realmente completas. Este estudo tem como objetivo definir um modelo conceitual para a aplicação FMEA de Processo reduzindo as variações nas interpretações, pontuações e critérios para as decisões. A partir de uma fundamentação teórica, é identificada uma estrutura para construção de FMEA onde as atividades de desenvolvimento são classificadas como qualitativas, quantitativas e corretivas, de acordo com o tipo de análise das avaliações. Um estudo específico é desenvolvido para cada categoria de avaliação, sendo um estudo de caso com a aplicação de FMEA associada aos conceitos de abordagem por processo, referente às análises qualitativas; um levantamento bibliográfico sobre critérios para pontuação em FMEA, referente às análises quantitativas; e um levantamento sobre as regras utilizadas para a recomendação de ações em FMEA de Processo, referente às análises corretivas. Como resultado tem-se uma proposta focada na eliminação de irregularidades na aplicação do FMEA, preenchendo uma lacuna existente entre a teoria e a prática.

**PALAVRAS-CHAVE:** FMEA de Processo, Abordagem por Processos, NPR

## **ABSTRACT**

In recent years it has been possible to note a considerable growth in the number of companies and people who use the Failure Mode and Effects Analysis, or FMEA, in process analysis. However, in its execution there are uncertainty situations, making possible to promote different types of information, raising questions whether the assessments are really complete. This study aims to define a conceptual model for Process FMEA application, reducing variations in interpretations, scoring and decisions criteria. From a theoretical framework, a structure for FMEA construction is identified, where those development activities are classified as qualitative, quantitative and corrective, according to the type of analysis of the evaluations. A specific study is developed for each category of evaluation. A case study in FMEA application associated with the concepts of process approach is done regarding qualitative analysis; a literature review on scoring FMEA criteria is done regarding quantitative analysis; and a survey on the rules used for recommending actions in Process FMEA is done regarding corrective analysis. As output, a proposal focused on the elimination of irregularities in the implementation of FMEA is done, filling a gap between theory and practice.

**KEYWORDS:** Process FMEA, Process Approach, RPN



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|              |                                                                          |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------|
| AHP          | <i>Analytic Hierarchy Process</i>                                        |
| AIAG         | <i>Automotive Industry Action Group</i>                                  |
| ANP          | <i>Analytic Network Process</i>                                          |
| DEA          | <i>Data Envelopment Analysis</i>                                         |
| DEMATEL      | <i>Decision Making Trial and Evaluation Laboratory</i>                   |
| FMEA         | <i>Failure Mode and Effects Analysis</i>                                 |
| ISM          | Modelo Estrutural Interpretativo                                         |
| ISO          | <i>International Organization for Standardization</i>                    |
| ISO 9001     | Sistema da Qualidade                                                     |
| ISO/TS 16949 | Sistema da Qualidade para fornecedores da indústria automobilística      |
| MAFMA        | <i>Multi-Attribute Failure Mode Analysis</i>                             |
| MCDM         | <i>Multi-Criteria Decision Making</i>                                    |
| MCS          | <i>Minimum Cut Sets Theory</i>                                           |
| MP           | <i>Mathematical Programing</i>                                           |
| MTBF         | Tempo Médio Entre Falhas                                                 |
| MTTR         | Tempo Médio Para Reparo Do Efeito                                        |
| NHPP         | Processo de Poisson Não-Homogêneo                                        |
| NPR          | Número de Prioridade de Risco                                            |
| OWA          | Média Ponderada Ordenada                                                 |
| QFD          | <i>Quality Functional Deployment</i>                                     |
| QS-9000      | Sistema da Qualidade para fornecedores da indústria automobilística      |
| RCA          | <i>Root Cause Analysis</i>                                               |
| SAE          | <i>Society of Automotive Engineers</i>                                   |
| TOPSIS       | <i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i> |

## LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

|           |                                    |
|-----------|------------------------------------|
| $A$       | Tamanho de amostra                 |
| $CR$      | Razão de Coerência                 |
| $\lambda$ | Autovalor da matriz de julgamentos |
| $D$       | Detecção                           |
| $n$       | Ordem da matriz de julgamentos     |
| $RI$      | Índice de coerência                |
| $N$       | População                          |
| $O$       | Ocorrência                         |
| $S$       | Severidade                         |
| $Z$       | Nível de confiança da amostragem   |
| $e$       | Margem de erro                     |
| $p$       | Proporção da amostragem            |

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Evolução das certificações ISO/TS 16949 no mundo .....                                                        | 19 |
| Figura 2 - Evolução das publicações científicas sobre FMEA nos últimos anos .....                                        | 20 |
| Figura 3 - Fluxograma do método de pesquisa .....                                                                        | 25 |
| Figura 4 - Formulário de FMEA de Processo .....                                                                          | 32 |
| Figura 5 - Passos da primeira etapa de execução de FMEA .....                                                            | 33 |
| Figura 6 - Passos da segunda etapa de execução de FMEA.....                                                              | 42 |
| Figura 7 - Passos da terceira etapa de execução de FMEA.....                                                             | 49 |
| Figura 8 - Passos da quarta etapa de execução de FMEA.....                                                               | 58 |
| Figura 9 - Abordagem por Processos.....                                                                                  | 70 |
| Figura 10 - Sequência de eventos do FMEA de Processo .....                                                               | 70 |
| Figura 11 - Eventos do FMEA dentro da abordagem de processos .....                                                       | 71 |
| Figura 12 - Atuação dos controles do FMEA na abordagem por processos.....                                                | 72 |
| Figura 13 - Fatores de pontuação em FMEA na abordagem por processos.....                                                 | 72 |
| Figura 14 - Típica aplicação de FMEA em operação de inspeção de recebimento.....                                         | 75 |
| Figura 15 - Típica aplicação de FMEA em operação de inspeção de recebimento com a<br>indicação das irregularidades ..... | 78 |
| Figura 16 - Interpretação de FMEA para o processo de inspeção de recebimento .....                                       | 79 |
| Figura 17 - Formulário FMEA de Processo atualizado, porém sem pontuação.....                                             | 80 |
| Figura 18 - Sequência de atividades do método AHP .....                                                                  | 84 |
| Figura 19 - Distribuição das referências para pontuação de Severidade .....                                              | 86 |
| Figura 20 - Gráfico das prioridades relativas referente às tabelas de Severidade .....                                   | 88 |
| Figura 21 - Distribuição das referências para pontuação de Ocorrência .....                                              | 90 |
| Figura 22 - Gráfico das prioridades relativas referente às tabelas de Ocorrência .....                                   | 92 |

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 23 - Distribuição das referências para pontuação de Detecção .....                            | 92  |
| Figura 24 - Gráfico das prioridades relativas referente às tabelas de Ocorrência .....               | 94  |
| Figura 25 - Formulário FMEA de Processo atualizado com pontuação, porém sem ações recomendadas ..... | 96  |
| Figura 26 - Regras para os casos de critérios únicos .....                                           | 104 |
| Figura 27 - Regras do Nível 1 para os casos de critérios escalonados .....                           | 106 |
| Figura 28 - Regras para os Níveis 1 e 2 para os casos de critérios escalonados .....                 | 106 |
| Figura 29 - Formulário FMEA de Processo atualizado com ações recomendadas e nova pontuação.....      | 112 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Referência para pontuação de Severidade baseada na descrição objetiva da consequência do modo de falha .....                    | 34 |
| Tabela 2 - Tabela para pontuação de Severidade dividida em cinco níveis agrupados de atribuição .....                                      | 35 |
| Tabela 3 - Referência baseada na sugestão de evolução da Severidade .....                                                                  | 36 |
| Tabela 4 - Referência para pontuação de Severidade pelo nível de importância da necessidade .....                                          | 36 |
| Tabela 5 - Referência para pontuação da Severidade em cinco níveis com base no reparo do efeito .....                                      | 37 |
| Tabela 6 - Referência para pontuação de Severidade com foco no usuário do veículo e também no processo de montagem do produto .....        | 38 |
| Tabela 7 - Referência para pontuação de Severidade com base em consequências associadas ao erro .....                                      | 39 |
| Tabela 8 - Referência para pontuação da Severidade sem descrição do critério de classificação .....                                        | 40 |
| Tabela 9 - Referência para pontuação da Severidade a partir da possibilidade da consequência das falhas .....                              | 41 |
| Tabela 10 - Referência para pontuação da Ocorrência sem descrição do critério de classificação .....                                       | 42 |
| Tabela 11 - Referência para pontuação de Ocorrência pela possibilidade de falha .....                                                      | 43 |
| Tabela 12 - Referência para pontuação de Ocorrência baseada no tempo médio entre falhas .....                                              | 44 |
| Tabela 13 - Referência para pontuação de Ocorrência baseada na provável taxa de falha com base referencial de mil peças .....              | 44 |
| Tabela 14 - Referência para pontuação de Ocorrência baseada na taxa de falha com base referencial a partir da ocorrência em uma peça ..... | 45 |

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 15 - Referência para valores de Ocorrência a partir do número de incidentes por itens ou veículos .....                      | 46 |
| Tabela 16 - Referência para pontuação de Ocorrência baseada na escala de ocorrência dentro de um determinado período de tempo ..... | 47 |
| Tabela 17 - Referência para pontuação de Ocorrência relacionada com a razão de ocorrência a cada um milhão de oportunidades.....    | 48 |
| Tabela 18 - Referência para pontuação de ocorrência a partir de critérios para taxa de falha anual .....                            | 48 |
| Tabela 19 - Referência para pontuação de Detecção a partir da probabilidade de um defeito chegar ao cliente.....                    | 50 |
| Tabela 20 - Referência para a pontuação de Detecção a partir da combinação de controles .....                                       | 51 |
| Tabela 21 - Referência para pontuação da Detecção sem descrição da classificação ....                                               | 51 |
| Tabela 22 - Referência para pontuação de Detecção com foco na causa da falha .....                                                  | 52 |
| Tabela 23 - Referência para pontuação de Detecção a partir da definição da oportunidade e probabilidade de Detecção .....           | 53 |
| Tabela 24 - Referência para pontuação de Detecção com base no índice da possibilidade de detecção da falha e frequência .....       | 54 |
| Tabela 25 - Referência para pontuação da Detecção a partir de escala de seis níveis....                                             | 55 |
| Tabela 26 - Referência para pontuação da Detecção com base na frequência.....                                                       | 55 |
| Tabela 27 - Referência para a pontuação da Detecção com base na probabilidade da consequência da falha .....                        | 56 |
| Tabela 28 - Ocorrência de irregularidades no FMEA apresentado na Figura 14.....                                                     | 77 |
| Tabela 29 - Escala de valores para a comparação paritária no método AHP.....                                                        | 85 |
| Tabela 30 - Julgamentos dos critérios de pontuação da severidade .....                                                              | 87 |
| Tabela 31 - Índice de coerência.....                                                                                                | 89 |
| Tabela 32 - Julgamentos dos critérios de pontuação da ocorrência.....                                                               | 91 |

Tabela 33 - Julgamentos dos critérios de pontuação da detecção ..... 93

Tabela 34 - Regras para nota de corte a partir da pontuação de Severidade..... 111

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 1 - Estrutura para construção do FMEA de acordo com o tipo de análise .....                                                   | 59  |
| Quadro 2 - Classificação dos Passos em relação ao tipo de análise do FMEA.....                                                       | 60  |
| Quadro 3 - Publicações que identificam as fragilidades mais exploradas na literatura..                                               | 64  |
| Quadro 4 - Irregularidades do FMEA por Etapa de execução de acordo com o tipo de análise.....                                        | 67  |
| Quadro 5 - Critérios para seleção da Empresa ALPHA e níveis de atendimento .....                                                     | 74  |
| Quadro 6 - Tabelas de referência para pontuação identificadas como mais adequadas para aplicação em FMEA de Processo.....            | 95  |
| Quadro 7 - Pontos detalhados relativos às características de uma pesquisa descritiva ..                                              | 98  |
| Quadro 8 - Mapeamento do perfil das empresas pesquisadas.....                                                                        | 100 |
| Quadro 9 - Classificação dos critérios para recomendação de ações .....                                                              | 102 |
| Quadro 10 - Mapeamento do perfil das empresas que adotam critérios únicos para a recomendação de ações em FMEA de Processo .....     | 103 |
| Quadro 11 - Mapeamento do perfil das empresas que adotam critérios escalonados para a recomendação de ações em FMEA de Processo..... | 105 |
| Quadro 12 - Regras e valores para critérios únicos .....                                                                             | 107 |
| Quadro 13 - Regras e valores para critérios escalonados.....                                                                         | 108 |
| Quadro 14 - Proposições levantadas e respectivas validações .....                                                                    | 110 |
| Quadro 15 - Modelo conceitual para aplicação de FMEA de Processo .....                                                               | 117 |



## SUMÁRIO

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                                 | <b>18</b> |
| 1.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DA PESQUISA.....                                               | 18        |
| 1.2. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA .....                                          | 21        |
| 1.3. DECLARAÇÃO DOS OBJETIVOS DA PESQUISA.....                                             | 23        |
| 1.4. MÉTODO DE PESQUISA.....                                                               | 23        |
| 1.5. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO .....                                                        | 25        |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE FMEA.....</b>                                            | <b>28</b> |
| 2.1. HISTÓRICO.....                                                                        | 28        |
| 2.2. CONCEITUAÇÃO .....                                                                    | 30        |
| 2.2.1. <i>Etapa 1 e a pontuação de Severidade .....</i>                                    | <i>33</i> |
| 2.2.2. <i>Etapa 2 e a pontuação de Ocorrência .....</i>                                    | <i>41</i> |
| 2.2.3. <i>Etapa 3 e a pontuação de Detecção.....</i>                                       | <i>49</i> |
| 2.2.4. <i>Etapa 4 e a priorização de ações.....</i>                                        | <i>57</i> |
| 2.3. ESTRUTURA PARA CONSTRUÇÃO DO FMEA.....                                                | 58        |
| 2.4. DIFICULDADES EM RELAÇÃO AO FMEA .....                                                 | 60        |
| <b>3. ANÁLISE QUALITATIVA REFERENTE À CONSTRUÇÃO DO<br/>MODELO ESTRUTURAL DO FMEA.....</b> | <b>68</b> |
| 3.1 FMEA E A ABORDAGEM DE PROCESSO .....                                                   | 69        |
| 3.2 APLICAÇÃO DO ESTUDO .....                                                              | 73        |
| <b>4. ANÁLISE QUANTITATIVA REFERENTE À PONTUAÇÃO E<br/>PRIORIZAÇÃO EM FMEA .....</b>       | <b>82</b> |
| 4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DAS TABELAS DE REFERÊNCIA PELA<br>APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP .....    | 83        |
| <b>5. ANÁLISE CORRETIVA REFERENTE À DECISÃO E AÇÕES DE<br/>MELHORIA EM FMEA .....</b>      | <b>97</b> |
| 5.1 PESQUISA EM EMPRESAS AUTOMOTIVAS DO ESTADO DE SÃO<br>PAULO.....                        | 98        |

|           |                                                              |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------|------------|
| 5.2       | ANÁLISE DOS DADOS DA PESQUISA.....                           | 102        |
| 5.3       | RESULTADOS DA PESQUISA.....                                  | 108        |
| <b>6.</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>                                        | <b>114</b> |
| 6.1       | CONSIDERAÇÕES GERAIS.....                                    | 114        |
| 6.2       | CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA .....                              | 116        |
| 6.3       | PROPOSTAS PARA NOVAS PESQUISAS .....                         | 117        |
|           | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                       | <b>119</b> |
|           | <b>APÊNDICE A - QUADRO EVOLUTIVO DAS PUBLICAÇÕES</b>         |            |
|           | <b>RELACIONADAS A FMEA NOS ÚLTIMOS 15 ANOS.....</b>          | <b>126</b> |
|           | <b>APÊNDICE B - RELAÇÃO DE PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS QUE</b>   |            |
|           | <b>ABORDAM A INTEGRAÇÃO DE FMEA COM OUTRAS TÉCNICAS.....</b> | <b>130</b> |
|           | <b>APÊNDICE C - ROTEIRO PARA ENTREVISTA SOBRE FMEA .....</b> | <b>134</b> |
|           | <b>APÊNDICE D - MAPEAMENTO DAS RESPOSTAS.....</b>            | <b>135</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DA PESQUISA

Devido a sua visibilidade e simplicidade, o método de Análise de Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA), é aplicado na gestão da qualidade para o desenvolvimento de produtos e processos (CHANG; CHANG; TSAI, 2013; CHIN *et al.*, 2009a; LIU *et al.*, 2014a; SEGISMUNDO; MIGUEL, 2008). Dentro de uma abordagem útil e sistemática para que uma equipe multidisciplinar possa apresentar as suas diferentes percepções e conhecimentos de forma estruturada (LIU *et al.*, 2015), o FMEA vem sendo notado como importante ferramenta na implementação de gestão da produção (CHANG; WEN, 2010).

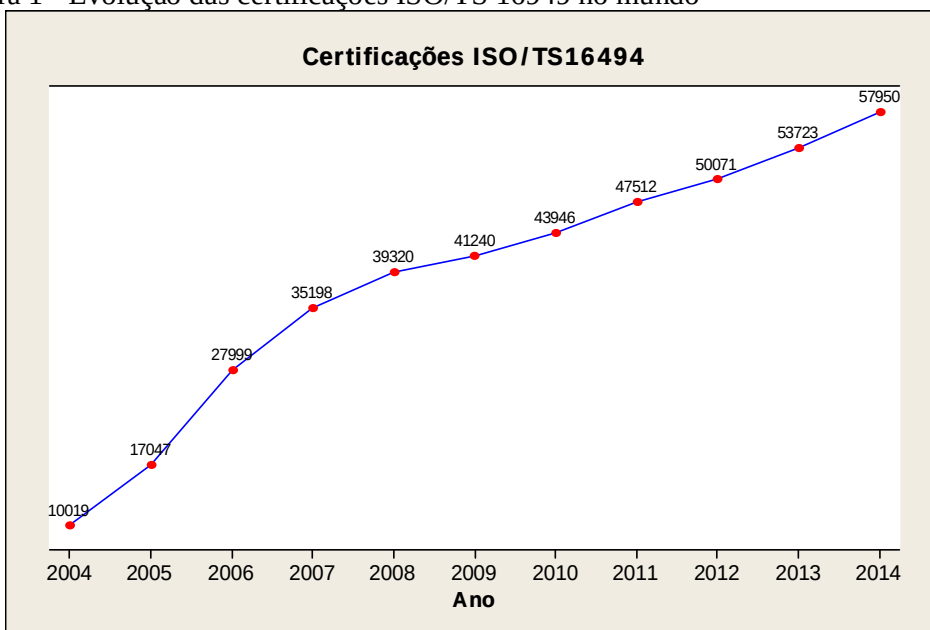
Considerada como um elemento chave no processo de planejamento de qualidade nas empresas, a aplicação de FMEA se destaca pela capacidade de quantificar os riscos do processo de modo com que os maiores riscos sejam facilmente identificados (REID, 2005), proporcionando a identificação e eliminação dos pontos fracos do processo, reduzindo o risco de falha a valores aceitáveis (CHANG; SUN, 2009). Empresas que implementam um processo de fabricação que responde à maioria dos controles definidos em FMEA, desenvolvem sistemas que fornecem dados sobre os impactos de suas falhas potenciais bem como das respectivas ocorrências e taxas de detecção (AGUIAR; SALOMON, 2007). Assim, o processo é documentado de uma forma padronizada (REID, 2005; TAY; LIM, 2006), sendo parte integrante do banco de dados de lições aprendidas (TENG *et al.*, 2006). Adicionalmente, com a necessidade de processos cada vez mais enxutos nas organizações, o FMEA tem importância na alocação eficiente de recursos (AHSEN, 2008; MANDAL; MAITI, 2014).

No FMEA, as decisões sobre a forma de melhorar uma operação baseiam-se no cálculo do Número de Prioridade de Risco (NPR) e este é um método muito útil para a avaliação de risco (XIAO *et al.*, 2011). Devido à sua facilidade intrínseca, o método NPR tem sido cada vez mais adotado na prática industrial, destacando as vantagens: é fácil de usar e entender, devido a sua simplicidade; as ações são bem documentadas e organizadas; possui uma sistemática para a tomada de decisão rápida (BRAGLIA, FANTONI e FROSOLINI, 2007). Uma forma de avaliar a evolução da utilização de FMEA é pela observação do número de empresas que fazem parte do segmento automotivo, onde, por ser um requisito mandatório

para o Sistema de Gestão da Qualidade, o FMEA deve ser utilizado no desenvolvimento de produtos e processos. De acordo com os dados da ISO Survey<sup>1</sup> (2015), é possível notar considerável crescimento no número de empresas com certificados ISO/TS 16949<sup>2</sup>, não só no Brasil, mas também no mundo. O aumento deste número é apresentado na Figura 1 e se dá basicamente por duas razões:

- a) A primeira delas está relacionada ao processo de delegação produtiva das montadoras junto a seus fornecedores.
- b) Os fornecedores diretos também deslocaram parte de suas atividades produtivas para empresas atuantes nos níveis mais inferiores da cadeia de fornecimento.

Figura 1 - Evolução das certificações ISO/TS 16949 no mundo



Fonte: ISO Survey (2015)

Assim, muitas pequenas e médias empresas atuantes em outras cadeias produtivas se inseriram na cadeia de fornecimento da indústria automotiva. A segunda razão, mais

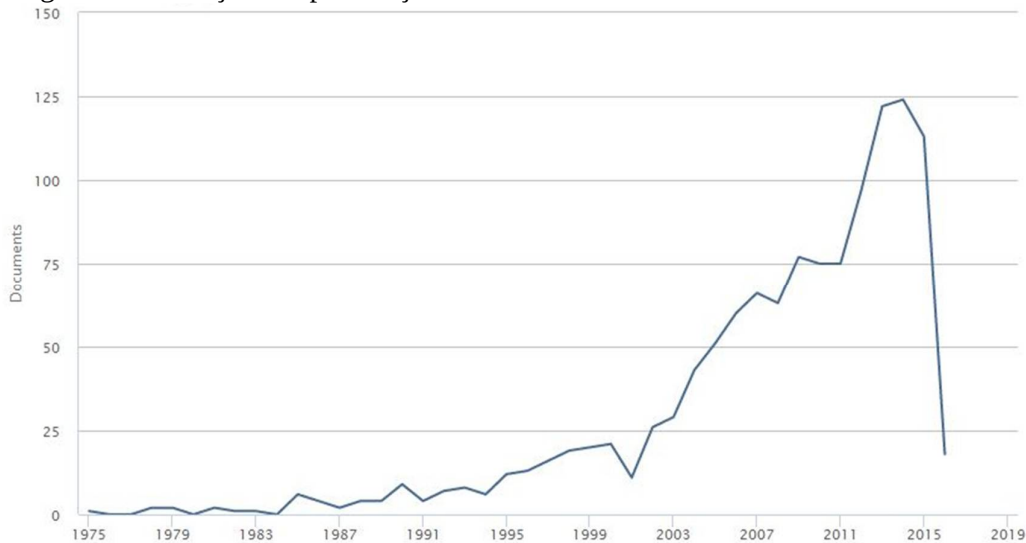
<sup>1</sup> The ISO Survey: Pesquisa realizada pela ISO que indica o número de certificados válidos para normas de gestão como a ISO 9001 e ISO/TS16949 por país, a cada ano.

<sup>2</sup> ISO/TS 16949: Especificação técnica ISO que alinha os requisitos de sistemas de gestão da qualidade das montadoras norte-americanas, alemãs, francesas, japonesas e italianas, formando um único sistema de qualidade automotiva.

especificamente voltada à indústria automotiva brasileira, envolve o próprio aumento da produção de veículos, novas plantas industriais para a produção de veículos que entraram em operação no Brasil, e também o aumento da capacidade produtiva das demais, provocando a expansão da gama de fornecedores. Estas duas situações resultam num considerável aumento de empresas com certificação ISO/TS 16949 em seus sistemas de gestão da qualidade.

Esta ascensão também reflete na quantidade de pesquisas publicadas sobre o tema, com uma evolução anual muito representativa. Em uma pesquisa realizada na base *Scopus*, com o termo FMEA, foi possível identificar uma evolução no número de publicações nos últimos quinze anos. Conforme apresentado na Figura 2, em 2000 foram publicadas cerca de 20 artigos científicos sobre FMEA, ao passo que em 2014 este número ultrapassa 125. Uma relação de 50 publicações científicas sobre FMEA, que representam a evolução nas pesquisas sobre o tema nos últimos 15 anos é apresentada no APÊNDICE A .

Figura 2 - Evolução das publicações científicas sobre FMEA nos últimos anos



Fonte: Scopus

Este panorama indica que a quantidade de pessoas envolvidas na utilização de FMEA vem aumentando significativamente nos últimos anos. Adicionalmente, como a nova versão da ISO 9001, lançada no final de 2015, que tem como um dos conceitos centrais o pensamento baseado na análise do risco (LAZARTE, 2014), há uma real possibilidade de um número ainda muito maior de pessoas passar a utilizar FMEA em suas rotinas operacionais, o que tornaria o assunto ainda mais relevante.

Contudo, mesmo sendo o FMEA cada vez mais aplicado, sua abordagem tradicional ainda apresenta algumas limitações na solução de problemas e, por conseguinte, uma série de métodos integrados com ferramentas de decisão ou ainda programação matemática tem sido sugerida na literatura (LIU *et al.*, 2015). Tais métodos têm sido aplicados com o intuito de atuar em fragilidades que envolvem fatores como o peso, precisão e conversão das pontuações para o cálculo de NPR (CARMIGNANI, 2009) e, aparentemente, não removendo os inconvenientes de um FMEA por completo (BOZDAG *et al.*, 2015). Alguns dos problemas relacionados ao planejamento das atividades do FMEA, o estabelecimento de uma equipe bem treinada e equilibrada, as dificuldades nas investigações e definições, ainda não possuem estudos em escala significativa (CARMIGNANI, 2009). Identifica-se aqui uma lacuna entre a teoria e a prática, que é a organização de um modelo estrutural do FMEA, de forma a se preparar melhor as definições dos elementos Causas, Falhas e Efeitos, para as respectivas atribuições de valores de Severidade, Ocorrência e Detecção.

## 1.2. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A relevância da realização desta pesquisa está associada ao grande aumento da utilização de FMEA e à forma com que as alternativas para minimizar as dificuldades identificadas em sua aplicação estão sendo propostas na literatura. Mesmo sendo o FMEA conceituado como uma importante técnica de análise de risco, nota-se que nos últimos anos uma quantidade considerável de pesquisa vem sendo realizada para melhorar seu desempenho pela integração de técnicas adicionais (LIU *et al.*, 2015). Entretanto, estes métodos têm sido em sua maioria absoluta, propostos para melhorar o cálculo de NPR e, aparentemente, não removendo os inconvenientes de um FMEA eficaz (BOZDAG *et al.*, 2015). O fato é que ainda existem muitas situações de incerteza na execução de um FMEA, seja por informações demasiadamente vagas (TENG *et al.*, 2006) ou mesmo por diferentes opiniões e conhecimentos entre os membros da equipe, promovendo diferentes tipos de informação, o que acaba gerando dúvidas se as avaliações estão completas e se os dados obtidos são realmente conhecidos e suficientemente completos para que possam receber atribuições de valores (CHIN *et al.*, 2009a).

Um ponto chave para o sucesso da implementação do FMEA é garantir que todos os participantes compreendam como utilizar FMEA (TENG *et al.*, 2006). Para eliminar ou minimizar o nível de dúvidas acerca das definições básicas de um FMEA, que correspondem

à categoria de análises qualitativas, surge aqui a proposta de se desenvolver esta fase do FMEA a partir de conceitos relacionados com a abordagem por processos, que é um aspecto inédito em relação a este assunto. A fim de demonstrar de uma forma clara a importância desta nova abordagem, uma comparação com a aplicação convencional é realizada, sendo que tal abordagem apresenta-se capaz de reduzir significativamente as dificuldades relacionadas às análises que envolvem o modelo estrutural do FMEA, impactando ainda numa melhor condição nas informações do FMEA para as atividades que envolvem as categorias de análises posteriores, que são as quantitativas e corretivas.

Em publicações científicas sobre o tema, nota-se recomendações para futuras pesquisas que sugerem maior clareza nas informações que envolvem o mapeamento estruturado que diminua situações de diferentes julgamentos para o mesmo modo de falha (CHIN *et al.*, 2009a), sendo por meio de padronização da linguagem (ESTORILIO; POSSO, 2010) ou desenvolvimento de trabalhos com expressões e definições mais adequadas para a pontuação (ZHANG; CHU, 2011). Algumas recomendações indicam a oportunidade de se melhorar a simplicidade do modelo estrutural do FMEA (BRADLEY; GUERRERO, 2011), seja por propostas onde as ponderações possam ser menos subjetivas (LIU; LIU; LIU, 2013) ou ainda necessidade de uma ferramenta de decisão de uso amigável (PACIAROTTI *et al.*, 2014).

A outra frente de sugestões para novas pesquisas está relacionada à cadeia causal, definida como a formação da sequência de eventos que são classificados como Causas, Falhas e Efeitos (KMENTA; ISHII, 2000; LEE, 2001; PACIAROTTI *et al.*, 2014). Esta frente envolve recomendações que considerem que não apenas a detecção da falha seja definida, mas também o conhecimento da origem da causa (CASSANELLI *et al.*, 2006) e também o nível de interação entre os modos de falha (ZAMMORI; GABBRIELLI, 2012b) seja em particularidades onde determinada falha pode levar a outras falhas (AHSEN, 2008), passando pela investigação de modos de falha potencialmente simultâneos (XIAO *et al.*, 2011) ou ainda até em que ponto as falhas são consideradas independentes (LOLLI *et al.*, 2015).

A experiência do autor na interação com diferentes equipes de FMEA em diferentes empresas do setor automotivo e a percepção da diversidade de conceitos na interpretação dos fatores a serem pontuados despertou a oportunidade da criação de um modelo conceitual que pudesse reduzir tal diversidade dentro de uma proposta que tornasse o FMEA uma ferramenta amigável, reduzindo aspectos subjetivos. Surge assim a ideia da integração do FMEA com o

conceito de abordagem por processos, tendo como ponto de partida para o desenvolvimento deste estudo, algumas recomendações para futuras pesquisas sugeridas na literatura que formam o embasamento teórico desta tese.

### 1.3. DECLARAÇÃO DOS OBJETIVOS DA PESQUISA

Os questionamentos da pesquisa que servem de base para a definição dos objetivos surgem a partir das justificativas abordadas na relevância da pesquisa. Tais questionamentos foram identificadas com dois focos em destaque, sendo um na necessidade de maior clareza nas definições em FMEA e outro a adequada definição da relação entre os elementos causa, falha e efeito. Assim, este trabalho tem como objetivo geral apresentar um modelo conceitual para a aplicação de FMEA de Processo reduzindo as variações nas interpretações, pontuações e critérios para as decisões. Para suplementar o objetivo geral, a pesquisa desenvolve os seguintes objetivos específicos:

- a) Desenvolver um estudo com a aplicação de FMEA de Processo com base nos conceitos de abordagem por processos visando diminuir dúvidas nas definições de causa, falha e efeito;
- b) Identificar na literatura as tabelas de referência mais apropriadas para a aplicação de FMEA de Processo, visando diminuir dúvidas nas atribuições de valores de Severidade, Ocorrência e Detecção;
- c) Identificar, por meio de pesquisa com empresas do segmento automotivo, aplicação de regra para a recomendação de ações em FMEA, diminuir dúvidas sobre a necessidade das propostas de melhoria.

### 1.4. MÉTODO DE PESQUISA

Este trabalho desenvolve um estudo classificado como pesquisa-ação, uma vez que há a implantação de uma ação por parte do grupo implicado no problema sobre observação. Um estudo de pesquisa-ação é formado por ciclos interativos de coleta de dados, realimentação destes dados para aqueles interessados, análise dos dados, tomada de ações e avaliação (TURRIONI, J. B.; MELLO, 2010). Neste trabalho são aplicados três ciclos, relacionados com cada um dos três objetivos específicos.

O primeiro deles, que está relacionado com as análises classificadas como qualitativas na fase de construção do modelo estrutural do FMEA, no Capítulo 3, tem como base a



estrutura conceitual teórica discutida no Capítulo 2 associada aos conceitos de abordagem por processos, que visa uma melhor estrutura das informações que servirão de base para as pontuações dos fatores em FMEA. Como técnicas de coleta de dados foram adotadas entrevistas não estruturadas com o coordenador do FMEA e também a observação direta dos formulários de FMEA já desenvolvidos e implementados, no caso para a atividade de inspeção de recebimento de matéria prima em uma empresa do segmento automotivo.

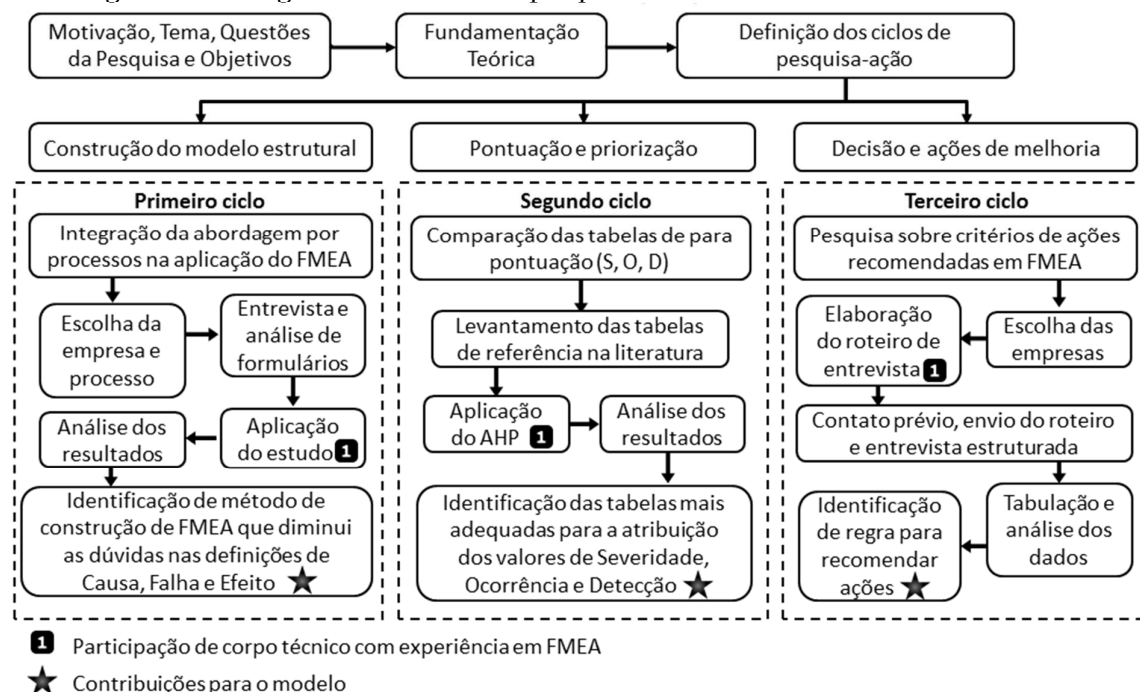
Já o segundo ciclo, que está relacionado com as análises classificadas como quantitativas na fase de pontuação e priorização em FMEA, no quarto Capítulo, pode ser classificado como um estudo teórico conceitual, tanto por condicionar o levantamento de informações que suportam a identificação das questões específicas de investigação (ROWLEY; SLACK, 2004), quanto por envolver discussões conceituais a partir de uma investigação na literatura para uma posterior comparação daquilo que foi investigado (NAKANO, 2012). Desta forma foram identificadas diferentes tabelas de referência para a atribuição dos valores de pontuação para os fatores de risco do FMEA. Rowley e Slack (2004) afirmam que tal comparação precisa ser organizada de forma a permitir uma decorrência lógica do problema, que neste estudo está disposta na distribuição para a comparação das tabelas de referência de pontuação de Severidade, Ocorrência e Detecção, levantadas na fundamentação teórica realizada no segundo Capítulo.

O terceiro e último ciclo, que está relacionado com as análises classificadas como corretivas na fase de decisão e ações de melhoria em FMEA, no quinto Capítulo, ocorre a partir de uma pesquisa estruturada em empresas do segmento automotivo, onde é usado um instrumento de coleta de dados em uma amostra significativa do problema a ser investigado e, posteriormente, conclusões são extraídas por meio de análises e inferências estatísticas (MIGUEL; HO, 2010). Esta pesquisa é classificada como descritiva por ser realizada para entender e descrever a distribuição de um fenômeno em uma população (FORZA, 2002), possuindo relevância tanto pela adequação da condição em que as unidades de análise se dispõem para as proposições, quanto pela representatividade dos entrevistados dentro das unidades de análise, além do tamanho da amostra ser suficiente para representar a população de interesse associado ao elevado nível de taxa de resposta (MIGUEL; HO, 2010).

Do ponto de vista da forma de abordagem do problema, uma pesquisa pode ser classificada como quantitativa, qualitativa ou combinada (MARTINS, 2012). Para o presente trabalho, a abordagem a mais adequada é a qualitativa, seja pelo delineamento do contexto do

ambiente da pesquisa e a proximidade com o fenômeno estudado no primeiro ciclo, seja pelas múltiplas fontes de evidência na fase central da análise comparativa das tabelas de referência para pontuação dos fatores de FMEA no segundo ciclo, ou ainda pela ênfase na interpretação subjetiva dos indivíduos na fase do terceiro ciclo. A Figura 3 apresenta o fluxograma do método da pesquisa com a identificação das etapas onde há participação de corpo técnico com experiência em FMEA, bem como as contribuições para o modelo proposto neste trabalho.

Figura 3 - Fluxograma do método de pesquisa



### 1.5. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Na proposta para se atingir os objetivos propostos, esta tese está dividida em seis Capítulos. O primeiro Capítulo visa introduzir o tema da pesquisa e o contexto onde ele está inserido, mostrar qual a problemática a ser tratada, delimitando assim o campo da pesquisa e identificando quais os objetivos que se pretende atingir. Adicionalmente, é descrita a metodologia utilizada na pesquisa e sua relevância.

No segundo Capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre FMEA de Processo, onde é abordada uma evolução histórica da utilização de FMEA, na sequência o formulário de FMEA é apresentado em um detalhamento da sua execução em uma abordagem passo a passo abrangendo quatro etapas distintas, com a apresentação de diversas tabelas de referência para a pontuação de Severidade, Ocorrência e Detecção. Neste capítulo também é destacada a

estrutura para construção do FMEA, onde as atividades de desenvolvimento são classificadas de acordo com o tipo de avaliação, e também são apresentadas as dificuldades em relação à sua utilização.

No terceiro Capítulo é apresentado o primeiro ciclo interativo da pesquisa-ação, onde são avaliadas situações referentes às análises qualitativas na fase de construção do modelo estrutural do FMEA. Para tanto é realizado um estudo com a aplicação de FMEA associada aos conceitos de abordagem por processo, onde uma aplicação tradicional de FMEA em uma operação de inspeção de recebimento é avaliada de acordo com os conceitos abordados no Capítulo 2 e algumas irregularidades são identificadas. Este mesmo FMEA é revisado considerando o alinhamento aos conceitos de abordagem por processos, e os resultados desta aplicação apresentam-se muito satisfatórios em termos de eliminação de situações de dúvidas que geram irregularidades.

No quarto Capítulo é apresentado o segundo ciclo interativo da pesquisa-ação, em um estudo das análises quantitativas referentes à fase de pontuação e priorização em FMEA. Este estudo tem como base as diversas tabelas de referência para a pontuação de Severidade, Ocorrência e Detecção, identificadas na fundamentação teórica realizada no segundo Capítulo. Com o auxílio do método AHP, são realizadas comparações paritárias com as tabelas de referência para atribuição de valores de cada fator do FMEA, onde são identificadas as propostas mais adequadas de acordo com a equipe responsável pelos julgamentos. As avaliações foram classificadas como coerentes a partir dos valores obtidos na análise de consistência determinada pelo método.

No quinto Capítulo é apresentado o terceiro ciclo interativo da pesquisa-ação, onde é desenvolvido um estudo referente às análises corretivas, que ocorrem na fase de decisão sobre ações de melhoria em FMEA. Neste estudo é realizado um levantamento em empresas automotivas do estado de São Paulo, onde uma consulta foi realizada a respeito das regras utilizadas para a recomendação de ações em FMEA de Processo. Aspectos como a taxa de participação e a representatividade da amostra em relação à população são relevantes para a validação dos dados obtidos. Estes dados são avaliados em termos de conceitos e valores limites para as pontuações, e uma regra é proposta com base na distribuição dos valores limites dos dados da pesquisa.

O sexto e último Capítulo apresenta as conclusões finais obtidas no estudo, as contribuições da pesquisa com o modelo conceitual proposto e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE FMEA

### 2.1. HISTÓRICO

O FMEA foi um dos primeiros métodos sistemáticos para análise de falhas (DROR, 2014). Seus primeiros registros da utilização são do ano de 1949 (PACIAROTTI *et al.*, 2014), quando o Exército dos EUA aplicou FMEA, com uso da referência militar MIL-P-1629 (SILVESTRI; DE FELICE; PETRILLO, 2012), no setor de aeronáutica a fim de resolver problemas de confiabilidade e segurança durante as fases de concepção e produção (MARRIOTT *et al.*, 2013). Na década de 1950, foi aplicado na indústria pela *Grumman Aircraft Corporation* (ZHANG; CHU, 2011). Foi desenvolvido pela primeira vez como uma metodologia formal de aplicação pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) em 1963 (BAHRAMI; BAZZAZ; SAJJADI, 2012; CHANG; CHENG, 2011; KUTLU; EKMEKÇIOĞLU, 2012; LIU *et al.*, 2015). Em 1974 foi criado o procedimento MIL-STD-1629, pelo exército norte-americano, que foi a primeira norma sobre FMEA (CHANG, 2009), ainda nos anos 1970, registram-se as primeiras aplicações de FMEA em instalações nucleares (BAHRAMI; BAZZAZ; SAJJADI, 2012; VAHDANI; SALIMI; CHARKHCHIAN, 2014). De acordo com a SAE (2001), no final dos anos 1960 e início dos anos 1970, vários grupos profissionais começaram a publicar procedimentos para a realização do FMEA, entre elas estão:

- a) SAE ARP 926, publicado em 1967, intitulado *Fault / Failure Analysis Procedure*;
- b) MIL STD 1629, publicado em 1974 e intitulado *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*.

Em 1985, a *International Electronic Commission* (IEC) publicou norma de FMEA para a confiabilidade de sistemas (CHANG, 2009). IEC812 é um dos procedimentos operacionais de FMEA modificado com base na MIL STD 1629, expandindo FMEA para equipamentos ou componentes eletrônicos, mecânicos e hidráulicos (YANG *et al.*, 2006). Em 1988, FMEA foi adotado na indústria automotiva pela *Ford Motor Company*, para avaliar falhas relacionadas ao projeto e processo (CHANG; WEN, 2010; KUTLU; EKMEKÇIOĞLU, 2012; LIU *et al.*, 2015) e desde então esta técnica passou a ser amplamente empregada não só na indústria automotiva, mas também ganhou aceitação em indústrias aeroespaciais, nucleares e químicas (CHIN *et al.*, 2009b). No entanto, foi no ramo automotivo que houve maior disseminação de

sua utilização, por ser um dos requisitos obrigatórios para os sistemas de gestão da qualidade (LIU *et al.*, 2015).

Em 1993, a fim de se concentrar as regras para os sistemas de gestão da qualidade em um único conjunto de requisitos para cadeia de abastecimento, o *Automotive Industry Action Group* (AIAG) e *American Society for Quality* (ASQ) uniram-se às montadoras *Daimler Chrysler Corporation*, *Ford Motor Company*, e *General Motors Corporation* e criaram um manual de referência para FMEA para atender aos requisitos da QS-9000<sup>3</sup> (CHANG, 2009). Atualmente, os sistemas de qualidade de empresas brasileiras no setor automotivo seguem a especificação técnica ISO/TS 16949, que de certa forma herdou a exigência do FMEA do antigo sistema QS 9000.

A emissão de certificados ISO/TS 16949 tem crescido consideravelmente. De acordo com os dados da *ISO Survey* (2015) o número de empresas com esta certificação no mundo aumentou de 10.019 em 2004 para 57.950 em 2014, sendo que no Brasil, a evolução foi de 299 para 1233, proporcionalmente maior para o mesmo período. Este panorama indica que o número de pessoas que conhecem e usam FMEA aumentou significativamente, o que torna o assunto cada vez mais relevante, devido a maior difusão em equipes técnicas e também pela relação entre clientes e fornecedores.

Existe ainda um fator que pode influenciar ainda mais no aumento da utilização do FMEA. A nova versão da norma ISO 9001, lançada no final de 2015 tem como um dos conceitos centrais o pensamento baseado na análise do risco (LAZARTE, 2014). Como os ciclos de certificação na nova versão ainda encontram-se em níveis iniciais, ainda não se conhece o grau de interação desta nova necessidade com a aplicação do FMEA, no aspecto de ser recomendada ou sugerida, entretanto têm-se a possibilidade da extensão de sua aplicação também para as empresas com certificação ISO 9001, que segundo dados da *ISO Survey* (2015), em 2014 o número de empresas certificadas era de 1.138.155, o que expandiria a aplicação de FMEA em praticamente 20 vezes mais do que se utiliza atualmente.

---

<sup>3</sup> QS 9000: Unificação de requisitos de sistemas da qualidade para fornecedores *Daimler Chrysler Corporation*, *Ford Motor Company*, e *General Motors Corporation*, com exigências adicionais àquelas definidas nos sistemas ISO 9000.

## 2.2. CONCEITUAÇÃO

A aplicação de FMEA tem sido considerada um elemento chave no processo de planejamento de qualidade nas empresas, conforme estudos de autores como Braglia, Fantoni e Frosolini (2007); Dong (2007); Liu *et al.* (2012); Reid (2005); Sharma, Kumar e Kumar (2007); Sant'anna, Meza e Ribeiro (2014); Teng *et al.* (2006); Xiao *et al.* (2011), os quais convergem na conclusão de que as organizações que realizam a aplicação de FMEA de forma completa, poupam recursos e apresentam elevados níveis de satisfação dos seus clientes. O FMEA é um procedimento sistemático para identificar os potenciais modos de falha, e suas causas e efeitos (MARIAJAYAPRAKASH; SENTHILVELAN, 2013), que permite identificar as características do processo que são críticas para os diferentes modos de falhas, seja por questões relacionadas à consequência da falha, à probabilidade de ocorrência, ou ainda à probabilidade de detecção antes que eles afetem o cliente (PUENTE *et al.*, 2002), sendo classificado como um importante método de tomada de decisão para a priorização de medidas para melhorar o desempenho de um produto ou sistema (DU *et al.*, 2014; XIAO *et al.*, 2011), eliminando ou reduzindo a taxa de falha (CHANG; SUN, 2009). Nas últimas décadas, o âmbito de aplicação do FMEA começou a ser também a ser expandida ao setor de serviços (ABBASGHOLIZADEH RAHIMI *et al.*, 2013).

Ahsen (2008) relata que, pela priorização dos riscos, o FMEA auxilia os gestores a realizarem alocações de recursos de forma mais eficiente. Isso ocorre pela relação existente entre a gravidade do efeito de falha, a frequência na qual a falha pode ocorrer e a probabilidade de detecção da falha. Empresas que implementam um processo de fabricação que responde à maioria dos controles definidos em FMEA, desenvolvem sistemas que fornecem dados sobre os impactos de suas falhas potenciais bem como suas respectivas ocorrências e taxas de detecção (AGUIAR; SALOMON, 2007), além de manter o processo documentado de uma forma padronizada (REID, 2005; TAY; LIM, 2006) e sendo parte integrante do banco de dados de lições aprendidas das empresas (TENG *et al.*, 2006) e atividades de melhoria (GAMBI; GEROLAMO; CARPINETTI, 2013; SONG *et al.*, 2014).

O FMEA deve ser usado para realizar a avaliação de risco e entender quais seriam os impactos sobre o cliente, se o processo vier a falhar. A equipe deve analisar qualquer ação para minimizar os riscos de processo (TENG *et al.*, 2006) e orientar as atividades de melhoria (ZHANG; CHU, 2011). O formulário de FMEA é conhecido como um “documento vivo” que deve ser revisto e atualizado sempre que os procedimentos sejam alterados (GAMBI;

GEROLAMO; CARPINETTI, 2013), exigindo a sua consulta e modificação nos casos em que o processo venha a ter qualquer problema de qualidade, a fim de garantir que todas as ações possíveis para evitar a repetição no futuro, sejam implementadas (AGUIAR; SALOMON, 2007). Puente *et al.* (2002) enfatizam que o FMEA avalia a gravidade de cada falha sobre o impacto nos clientes, bem como a sua possibilidade ocorrência da causa e detecção de falhas antes de atingir os clientes.

O FMEA de Processo é aplicado pela equipe responsável pelo planejamento da manufatura, ainda na fase de desenvolvimento, a fim de garantir de forma antecipada a avaliação dos modos de falha potenciais do processo e a consequente definição de mecanismos de controle a serem empregados (CASSANELLI *et al.*, 2006; CHANG; CHANG; TSAI, 2013; SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2007). O objetivo do FMEA é analisar as características de concepção em relação ao processo de fabricação para assegurar que o produto resultante satisfaça as necessidades e expectativas dos clientes (FEILI *et al.*, 2013), evitar que falhas inaceitáveis possam atingir o cliente (KESKIN; ÖZKAN, 2009), identificando e priorizando modos de falha (HADI-VENCHEH; AGHAJANI, 2013) a fim de iniciar ações corretivas adequadas que poderiam ou eliminar as causas de falhas ou atenuar os seus efeitos (LIU *et al.*, 2015). Assim, os problemas conhecidos e potenciais são analisados no desenvolvimento do processo (LIU *et al.*, 2011) de forma a se propor melhorias nos pontos mais críticos (LOLLI *et al.*, 2015). Adicionalmente, o FMEA atua para ajudar a equipe na alocação mais eficiente dos recursos, pela priorização de possíveis modos de falha do processo, associados às suas causas e aos seus efeitos (AHSEN, 2008; MANDAL; MAITI, 2014). Tal priorização resulta em ações para melhorar o desempenho do processo, eliminando seus pontos fracos, reduzindo assim os riscos de falha a valores aceitáveis (CHANG; SUN, 2009).

O FMEA de Processo ainda auxilia na definição e melhoria de soluções de engenharia em resposta à qualidade, confiabilidade, facilidade de manutenção, custos e produtividade (AHSEN, 2008). Esta aplicação é registrada em um formulário específico (DROR, 2014) como mostrado na Figura 4. Este formulário ou sua documentação equivalente, que combina os modos de falhas potenciais associados com as causas, efeitos, ações recomendadas, entre outros, deve ser uma parte do pacote de engenharia, assim como desenhos de engenharia, especificações de teste, entre outros (TENG *et al.*, 2006).



Figura 4 - Formulário de FMEA de Processo

| ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS<br>FMEA DE PROCESSO |                               |                                      |                  |                  |                                            |                  |                                |                                                                  |                  |             |                        |                                                                                 |                                     |                  |                  |                  |             |  |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------|--|
| Data Chave :<br>Projeto :<br>Peça :<br>Participantes :         |                               |                                      |                  |                  |                                            |                  |                                | No. FMEA :<br>Pag. / Rev. :<br>Preparado por :<br>Data da FMEA : |                  |             |                        |                                                                                 |                                     |                  |                  |                  |             |  |
| Item /<br>Função                                               | Modo<br>de Falha<br>Potencial | Efeito(S)<br>Potencia(S)<br>de Falha | S<br>E<br>V<br>E | C<br>L<br>A<br>S | Causa<br>Potencial<br>( 6M )<br>Mecanismos | O<br>C<br>O<br>R | Controle de<br>Prevenção Atual | Controle de<br>Detecção Atual                                    | D<br>E<br>T<br>C | N<br>P<br>R | Ações<br>Recomen-dadas | Responsabi-<br>lidade pelas<br>ações<br>recomenda-das<br>e prazos<br>envolvidos | Ações Resultantes<br>Ação<br>Tomada | S<br>E<br>V<br>E | O<br>C<br>O<br>R | D<br>E<br>T<br>C | N<br>P<br>R |  |
|                                                                |                               |                                      |                  |                  |                                            |                  |                                |                                                                  |                  |             |                        |                                                                                 |                                     |                  |                  |                  |             |  |

Fonte: AIAG (2008)

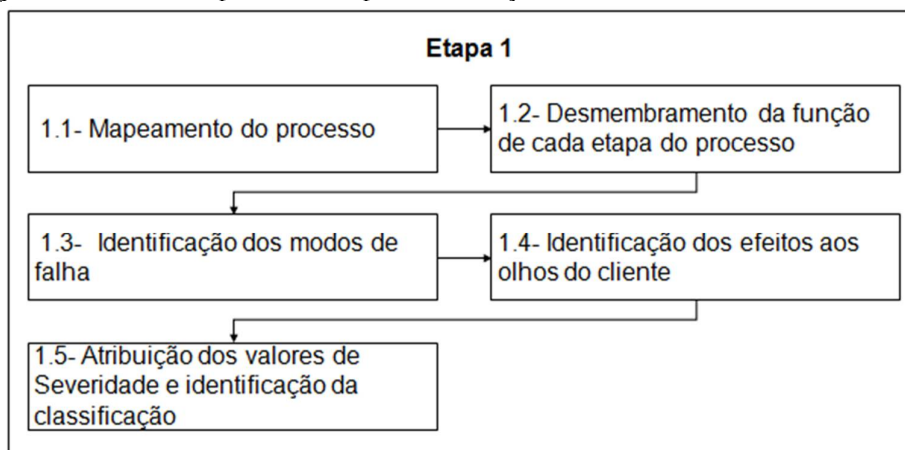
Para a aplicação do FMEA de Processo, é necessária a formação de um grupo de pessoas para identificar o processo a ser analisado (SANT'ANNA, 2012), as suas funções, os tipos de falhas que podem ocorrer, os efeitos e as possíveis causas de tais falhas (PUENTE *et al.*, 2002). Em seguida, o grupo avalia os riscos de cada causa da falha, onde são desenvolvidas métricas de medição a partir de cálculos simples que envolvem três fatores: O primeiro fator é a Severidade (S), que mede a gravidade do efeito da falha. O segundo fator é a Ocorrência (O), que é a probabilidade para cada causa potencial torna-se um fracasso. O terceiro fator é a Detecção (D), que se refere à capacidade de detectar possíveis falhas antes do impacto do efeito (CHANG; SUN, 2009; SAWHNEY *et al.*, 2010).

Para a atribuição de valores numéricos em cada fator do Número de Prioridade de Risco, ou NPR, é necessário que a equipe seja formada por especialistas que possuem amplo conhecimento do sistema em consideração (NETTO; HONORATO; QASSIM, 2013). Como afirmam Estorilio e Posso (2010), o risco que envolve o processo, em termos de qualidade, é obtido por meio do produto entre estes três fatores e sua finalidade é indicar as prioridades das ações recomendadas. Para esta sequência de atividades, Aguiar & Salomon (2007) propõem a execução passo a passo do FMEA formada por 14 Passos, divididos em quatro Etapas, sendo que a primeira tem como resposta a pontuação de Severidade, e com a Ocorrência, a Detecção e o NPR, como as respostas das Etapas dois, três e quatro, respectivamente.

### 2.2.1. Etapa 1 e a pontuação de Severidade

FMEA de Processo inicia-se pelo desenvolvimento de uma lista do que se espera que o processo realize (VINODH; SANTHOSH, 2012), por meio de estudos envolvendo a intenção, propósito ou objetivo de cada fase do processo, geralmente identificada pela interação entre o diagrama de fluxo e a análise das tarefas ao longo do processo (TAY; LIM, 2006). Para identificar os modos de falha de cada fase do processo, a equipe precisa identificar a função de cada uma destas fases e, a partir da não execução destas funções, têm-se as definições dos modos de falha (TANIK, 2010; TENG *et al.*, 2006). A consequência de cada modo de falha identificado, seja na próxima estação do processo ou no produto em utilização, define o efeito potencial da falha (PALADY, 1997). A pontuação de Severidade é a forma de classificar a gravidade destes efeitos das falhas (LIU *et al.*, 2015) onde valores são atribuídos no intuito de se fornecer uma medida qualitativa das piores consequências potenciais resultantes de um modo de falha (SHARMA; KUMARI; KUMAR, 2011; VINODH; SANTHOSH, 2012), podendo estar relacionada com o custo das ações que terão que ser tomadas para corrigir ou compensar os efeitos de uma falha após ter ocorrido (LILLIE; SANDBORN; HUMPHREY, 2015) ou ainda considerando perdas de um desempenho do sistema (XU *et al.*, 2002) e o ponto de vista da satisfação do cliente (PACIAROTTI *et al.*, 2014). Do mapeamento do processo à atribuição dos valores de Severidade, a Figura 5 apresenta a sequência dos cinco passos que compõem a primeira Etapa de execução do FMEA.

Figura 5 - Passos da primeira etapa de execução de FMEA



Fonte: (AGUIAR; SALOMON, 2007)

Como principal informação desta primeira etapa, cada modo de falha é classificado quanto ao impacto dos seus efeitos pela atribuição do índice de Severidade (BAHRAMI;

BAZZAZ; SAJJADI, 2012), assumido de acordo com o efeito final de uma falha (RHEE; ISHII, 2003). A coluna Severidade define esta classificação por uma pontuação que varia de um a dez, sendo nota um para o menos grave e nota dez para o mais grave (TOZZI, 2004). Barends *et al.* (2012) apresentam, em um estudo sobre FMEA na área farmacêutica, uma tabela para referência de pontuação de Severidade em dez níveis, com a definição da severidade baseada na descrição clara e objetiva da consequência do modo de falha. A Tabela 1 apresenta a referência para pontuação de Severidade baseada na descrição objetiva da consequência do modo de falha.

Tabela 1 - Referência para pontuação de Severidade baseada na descrição objetiva da consequência do modo de falha

| Pontuação | Definição da severidade do modo de falha | Consequência do modo de falha com essa severidade   |
|-----------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 10        | Perigosamente Alta                       | As pessoas podem ficar gravemente feridas           |
| 9         | Extremamente Alta                        | Falhas que não atendem as normas legais             |
| 8         | Muito Alta                               | O cliente final percebe o defeito no produto        |
| 7         | Alta                                     | Rejeição de produtos produzidos                     |
| 6         | Moderada                                 | Longo atraso no processo pela realização de reparos |
| 5         | Baixa                                    | Moderado atraso no processo                         |
| 4         | Muito Baixa                              | Curto atraso no processo                            |
| 3         | Extremamente Baixa                       | Esforço extra para produzir sem atrasos.            |
| 2         | Quase Nenhuma                            | Falha não perceptível pouco efeito                  |
| 1         | Nenhuma                                  | Não perceptível nenhum efeito relevante             |

Fonte: (BARENDTS *et al.*, 2012)

Uma referência para pontuação de Severidade dividida em cinco níveis de atribuições é apresentada na Tabela 2. Esta proposta tende a aumentar a subjetividade devido à descrição muito superficial e a possibilidade da classificação de mais de um valor na mesma categoria. Este tipo de tabela não tem sido mais encontrada em publicações sobre aplicação de FMEA, porém já foi bastante utilizada entre o final dos anos 1990 e início dos anos 2000, tais como: Ben-Daya e Raoulf (1996) em uma aplicação de FMEA com base em análise de custo em processo de mineração; Braglia (2000) na aplicação de um modelo de decisão multi-atributo associado ao FMEA no ramo de frigoríficos; Chang, Liu e Wei (2001) em uma proposta de FMEA associado à Teoria Gray aplicada em painéis elétricos automotivos ou ainda Puente *et*

al. (2002), onde é descrita uma associação de FMEA com Lógica *Fuzzy* em um exemplo ilustrativo.

Tabela 2 - Tabela para pontuação de Severidade dividida em cinco níveis agrupados de atribuição

| Severidade                         | Pontuação |
|------------------------------------|-----------|
| O cliente provavelmente não notará | 1         |
| Ligeiramente percebido             | 2,3       |
| Insatisfação do cliente            | 4, 5, 6   |
| Alto grau de insatisfação          | 7,8       |
| Compromete segurança ou legislação | 9, 10     |

Fonte: (BEN-DAYA e RAOUF, 1996; BRAGLIA, 2000; CHANG, LIU e WEI, 2001; PUENTE *et al.*, 2002)

Em uma publicação intitulada "A casa da confiabilidade", Braglia, Fantoni e Frosolini (2007) desenvolvem um estudo de FMEA associado ao QFD, ou *Quality Functional Deployment*, para o mapeamento de falhas e respectivos custos envolvidos, durante um novo ciclo de desenvolvimento de produtos. Nesta publicação os autores apresentam critérios para pontuação de Severidade baseada na sugestão de sua evolução, considerando desde o nível de percepção do defeito e grau de insatisfação dos clientes, até situações mais extremas como perda da função e questões regulamentares e de segurança, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Referência baseada na sugestão de evolução da Severidade

| Sugestão de evolução de severidade |                                                                     |           |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| Efeito                             | Critério                                                            | Pontuação |
| Perigoso sem aviso                 | Não-Conformidade com a regulamentação do governo, sem aviso prévio. | 10        |
| Perigoso com aviso                 | Não-Conformidade com a regulamentação do governo, com aviso prévio. | 9         |
| Muito Alta                         | Perda de função primária.                                           | 8         |
| Alta                               | Clientes muito insatisfeitos.                                       | 7         |
| Moderada                           | Clientes insatisfeitos.                                             | 6         |
| Baixa                              | Clientes pouco insatisfeitos.                                       | 5         |
| Muito Baixa                        | Defeito notado pela maioria dos clientes (mais de 75%).             | 4         |
| Mínima                             | Defeito notado por 50% dos clientes.                                | 3         |
| Muito Mínima                       | Defeito notado por discriminar clientes (menos de 25%).             | 2         |
| Nenhuma                            | Nenhum efeito discernível.                                          | 1         |

Fonte: (BRAGLIA; FANTONI; FROSOLINI, 2007)

Autores como Fernandes e Rebelato (2006) e Tay e Lim (2006), respectivamente, em estudos envolvendo a integração entre FMEA e QFD num exemplo de aplicação em funções de uma lâmpada incandescente; e entre FMEA e Lógica *Fuzzy* aplicado num processo de fabricação de semicondutores, apresentaram a referência para a atribuição de valores de Severidade com base em cinco níveis de importância da necessidade, classificada de muito baixa a muito alta. Mesmo dentro do intervalo de um a dez, não existem opções para a atribuição de cinco valores dentro deste intervalo, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Referência para pontuação de Severidade pelo nível de importância da necessidade

| Importância da Necessidade | Critério                                                                           | Severidade |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Muito alta                 | Necessidade em relação à segurança do usuário.                                     | 10         |
| Alta                       | Necessidade relacionada às funções primárias do produto ou serviço.                | 8          |
| Moderada                   | Necessidades relacionadas às funções secundárias porém relevantes ao cliente.      | 6          |
| Baixa                      | Necessidade relacionada às funções secundárias, porém pouco relevantes ao cliente. | 4          |
| Muito baixa                | Necessidade relacionada às funções secundárias, porém irrelevantes ao cliente.     | 1          |

Fonte: (FERNANDES; REBELATO, 2006; TAY; LIM, 2006)

Os autores Sharma, Kumar e Kumar (2005) demonstram em um estudo de caso em uma indústria de papel, um critério de atribuição de valores de severidade baseado no tempo médio para reparo do efeito, ou MTTR. Tal critério é dividido em cinco níveis, e pela possibilidade de classificação de mais de um valor na mesma categoria, apresenta considerável incerteza. Esta referência para pontuação da Severidade em cinco níveis com base no reparo do efeito é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Referência para pontuação da Severidade em cinco níveis com base no reparo do efeito

| <b>Pontuação</b> | <b>Efeito de Severidade</b> | <b>Significado</b>                 |
|------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 1                | Remoto                      | Menor MTTR > 1 hora                |
| 2, 3             | Baixo                       | MTTR > 1 dia                       |
| 4, 5, 6          | Moderado                    | MTTR 1-4 dias                      |
| 7, 8             | Alto                        | Intervenção externa para reparos   |
| 9, 10            | Muito Alto                  | Linha perdida ou perda de produção |

Fonte: (SHARMA, KUMAR e KUMAR, 2005)

O Manual de FMEA atualmente adotado como o principal referencial na indústria automotiva está em sua quarta edição, publicada pela AIAG (2008). Neste manual é recomendada a utilização de uma tabela de referência para a atribuição de valores de Severidade em FMEA com base em situações com o foco no processo do cliente e no usuário do veículo. Esta referência apresentada na Tabela 6 possui como aspecto favorável o nível de detalhamento das informações, porém existem situações que podem ser consideradas muito específicas para determinada condição.

Tabela 6 - Referência para pontuação de Severidade com foco no usuário do veículo e também no processo de montagem do produto

| Efeito                                                              | Crítérios: Severidade do Efeito no Produto (Efeito no Cliente)                                                                               | Classificação | Efeito                                                              | Crítérios: Severidade do Efeito no Processo (Efeito na Fabricação/Montagem)                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Falha em Atender a Requisitos de Segurança e/ou Regulatórios</b> | Modo de falha potencial afeta a operação segura do veículo e/ou envolve não-conformidade com regulamentação governamental, sem prévio aviso. | 10            | <b>Falha em Atender a Requisitos de Segurança e/ou Regulatórios</b> | Pode trazer perigo ao operador (de máquina ou montagem), sem prévio aviso.                                                                                     |
|                                                                     | Modo de falha potencial afeta a operação segura do veículo e/ou envolve não-conformidade com regulamentação governamental, com prévio aviso. | 9             |                                                                     | Pode trazer perigo ao operador (de máquina ou montagem), com prévio aviso.                                                                                     |
| <b>Perda ou Degradação da Função Primária</b>                       | Perda da função primária (veículo inoperável, não afeta a operação segura do veículo).                                                       | 8             | <b>Interrupção Maior</b>                                            | 100% dos produtos podem ser refugados. Parada da linha de produção ou parada de embarque (expedição).                                                          |
|                                                                     | Degradação da função primária (veículo operável, mas com um nível reduzido de desempenho).                                                   | 7             | <b>Interrupção Significante</b>                                     | Uma parcela do lote de produção pode ser refugada. Desvio do processo primário, incluindo velocidade reduzida da linha de produção e acréscimo de mão de obra. |
| <b>Perda ou Degradação da Função Secundária</b>                     | Perda da função secundária (veículo operável, mas as funções de conforto/conveniência estão inoperáveis).                                    | 6             | <b>Interrupção Moderada</b>                                         | 100% do lote de produção pode ser retrabalhado fora da linha e aceito.                                                                                         |
|                                                                     | Degradação da função secundária (veículo operável, mas as funções de conforto/conveniência apresentam um nível reduzido de desempenho).      | 5             |                                                                     | Uma parcela do lote de produção pode ser retrabalhada fora da linha e aceita.                                                                                  |
| <b>Incômodo</b>                                                     | Aparência ou Ruído Audível, veículo operável, item não conforme e percebido pela maioria dos clientes (>75%).                                | 4             | <b>Interrupção Moderada</b>                                         | 100% do lote de produção podem ser retrabalhados na estação, antes de ser processado.                                                                          |
|                                                                     | Aparência ou Ruído Audível, veículo operável, item não conforme e percebido por muitos clientes (>55%).                                      | 3             |                                                                     | Uma parcela do lote de produção pode ser retrabalhada na estação, antes de ser processado.                                                                     |
| <b>Nenhum efeito</b>                                                | Aparência ou Ruído Audível, veículo operável, item não conforme e percebido por clientes observadores (<25%).                                | 2             | <b>Interrupção Menor</b>                                            | Ligeira inconveniência para o processo, operação ou operador.                                                                                                  |
|                                                                     | Nenhum efeito perceptível.                                                                                                                   | 1             | <b>Nenhum Efeito</b>                                                | Nenhum efeito perceptível.                                                                                                                                     |

Fonte: AIAG (2008)

Em um estudo de caso que envolve a integração de FMEA e QFD em um processo de embalagem de alimentos, Tanik (2010) esclarece a forma de pontuação de Severidade por meio de uma série de consequências associadas ao erro, em dez níveis, como apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Referência para pontuação de Severidade com base em consequências associadas ao erro

| Pontuação | Severidade                                                  |
|-----------|-------------------------------------------------------------|
| 10        | Pode causar erros fatais.                                   |
| 9         | Pode causar discrepâncias legais.                           |
| 8         | Retornar ordem e alto nível de insatisfação do cliente.     |
| 7         | Retornar ordem e nível moderado de insatisfação do cliente. |
| 6         | Retorno parcial e insatisfação do cliente.                  |
| 5         | Sem retorno e insatisfação do cliente.                      |
| 4         | Pode Causar dificuldade durante o uso pelo cliente.         |
| 3         | Problema se usado errado pelo cliente.                      |
| 2         | Erro ignorável                                              |
| 1         | Não detectado erro ou nenhum erro.                          |

Fonte: (TANIK, 2010)

Em uma publicação que trata da implantação de um sistema a prova de erro com base na associação de FMEA com outras ferramentas da qualidade em um ambiente hospitalar, Terninko (2003) utiliza uma tabela de referência para atribuição dos valores de Severidade muito simples e genérica, que a pesar de estar classificada em dez níveis, não apresenta qualquer tipo de descrição do critério de classificação. Chang, Chang e Tsai (2013) utilizam esta mesma referência de pontuação de Severidade em um estudo que envolve a utilização de FMEA associado à Teoria *Grey* aplicado em avaliações de ensaios laboratoriais. A Tabela 8 apresenta a referência para pontuação da Severidade sem descrição do critério de classificação.



Tabela 8 - Referência para pontuação da Severidade sem descrição do critério de classificação

| Severidade        | Pontuação |
|-------------------|-----------|
| Nenhuma           | 1         |
| Muito desprezível | 2         |
| Desprezível       | 3         |
| Pequena           | 4         |
| Moderada          | 5         |
| Significante      | 6         |
| Grande            | 7         |
| Extrema           | 8         |
| Séria             | 9         |
| Catastrófica      | 10        |

Fonte: (CHANG; CHANG; TSAI, 2013; TERNINKO, 2003)

Yang, Bonsall e Wang (2008) apresentam, em uma aplicação de FMEA na indústria naval, uma proposta de definição de regras para recomendação ações em NPR baseada a partir de Lógica *Fuzzy*, onde utilizam uma tabela de referência para atribuição de valores de Severidade dividida em cinco níveis, com uma breve descrição da severidade associadas a explicações que envolvem possibilidade da consequência das falhas, sendo aspectos de segurança e legislação para os casos mais graves e pequenas interrupções e necessidade de manutenção para as situações mais brandas. A Tabela 9 apresenta a referência para pontuação da Severidade a partir da possibilidade da consequência das falhas.

Tabela 9 - Referência para pontuação da Severidade a partir da possibilidade da consequência das falhas

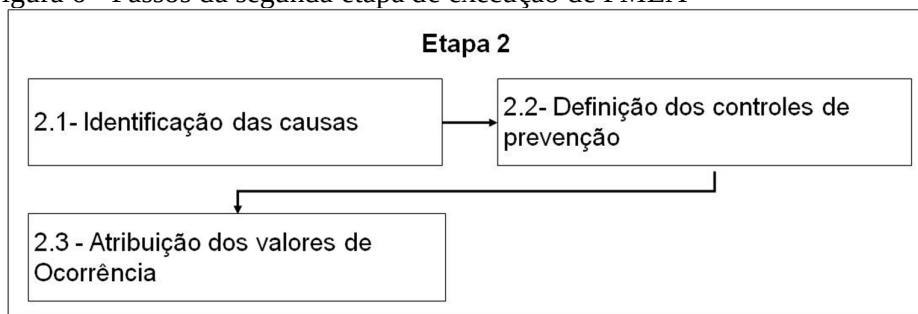
| Pontuação | Severidade   | Significado                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10, 9     | Catastrófica | Possível de múltiplas mortes, morte única provável ou perda total do sistema. Classificação de alta gravidade quando um modo de falha potencial afeta operação de segurança ou envolve não-conformidade com regulamentos do governo.       |
| 8, 7      | Crítica      | Possível morte única, falhas múltiplas graves prováveis ou danos graves ao sistema. Alto grau de interrupção de operação devido à natureza das falhas, tais como uma plataforma inoperável ou um subsistema de conveniência inoperável.    |
| 6, 5      | Moderada     | Possível de múltiplas falhas pequenas ou um único ferimento grave, danos no sistema moderado. Operações e produção interrompida marginalmente, e voltou ao seu modo de funcionamento habitual dentro de, digamos, não mais do que 4 horas. |
| 4, 3      | Desprezível  | Possível de falhas simples ou múltiplas pequenas no sistema. Operações do sistema interrompido ligeiramente, e retomou ao seu modo operacional normal dentro de um curto período de tempo (por exemplo, menos de 2 horas).                 |
| 2, 1      | Nenhuma      | No máximo uma única falha leve ou manutenção pequena necessária (serviço e operações podem continuar).                                                                                                                                     |

Fonte: (YANG; BONSALL; WANG, 2008)

### 2.2.2. Etapa 2 e a pontuação de Ocorrência

Após o reconhecimento dos modos de falha e seus efeitos potenciais, inicia-se uma atividade investigativa no processo, buscando a identificação das possíveis causas a serem classificadas quanto à possibilidade de ocorrência (FEILI *et al.*, 2013). Tal probabilidade é identificada de forma mais adequada após a definição do controle de prevenção, cuja função está relacionada com a prevenção da ocorrência da causa. (OOKALKAR; JOSHI; OOKALKAR, 2009). Uma causa potencial de falha é interpretada como um ponto fraco do processo que pode resultar no modo de falha (LIU *et al.*, 2015). A Ocorrência é a probabilidade do surgimento desta causa ou mecanismo específico (BAHRAMI; BAZZAZ; SAJJADI, 2012; FEILI *et al.*, 2013) e, por consequência, gerar um modo de falha (KOLICH, 2014; RHEE; ISHII, 2003; VINODH; SANTHOSH, 2012). A Ocorrência pode ser determinada com base em histórico de modos de falhas documentadas por um período de três anos (PETROVIĆ *et al.*, 2014), ou ainda tendo como referência o índice de capacidade de processo (HAEFNER *et al.*, 2014). Para a pontuação de Ocorrência, recomenda-se interpretar a causa potencial como a forma pela qual a falha poderia vir a ocorrer, descrita em termos de algo que possa ser corrigido ou controlado (AGUIAR; SALOMON, 2007). Da identificação das causas potenciais à atribuição dos valores para ocorrência, a Figura 6 apresenta a sequência dos três passos que compõem a segunda Etapa de execução do FMEA.

Figura 6 - Passos da segunda etapa de execução de FMEA



Fonte: (AGUIAR; SALOMON, 2007)

Um modo de falha pode ter várias causas com diferentes probabilidades de ocorrência (TENG *et al.*, 2006), cada causa é classificada pela pontuação de Ocorrência, convencionalmente estimada em uma escala de um a dez. Em um estudo sobre FMEA em processos químicos na indústria farmacêutica, conduzido por Barends *et al.* (2012), assim como na utilização de FMEA associado à Teoria Grey aplicado em avaliações de ensaios laboratoriais por Chang, Chang e Tsai (2013), é utilizada uma referência para a atribuição de valores de Ocorrência bem simples e genérica, que a pesar de estar classificada em dez níveis, não apresenta qualquer tipo de descrição do critério de classificação, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Referência para pontuação da Ocorrência sem descrição do critério de classificação

| <b>Ranking típico de índices de modo de falha</b> |                  |
|---------------------------------------------------|------------------|
| <b>Nível</b>                                      | <b>Definição</b> |
| 1                                                 | Quase Nunca      |
| 2                                                 | Remoto           |
| 3                                                 | Muito Leve       |
| 4                                                 | Leve             |
| 5                                                 | Baixa            |
| 6                                                 | Média            |
| 7                                                 | Moderada Alta    |
| 8                                                 | Alta             |
| 9                                                 | Muito Alta       |
| 10                                                | Quase Certo      |

Fonte: (BARENDs *et al.*, 2012; CHANG; CHANG; TSAI, 2013)

A Tabela 11 apresenta referência para pontuação de Ocorrência pela possibilidade de falha, sendo utilizada por autores em publicações com diferentes focos, tais como: aplicação de FMEA com base em análise de custo (BEN-DAYA; RAOUF, 1996); montagem de painéis eletrônicos automotivos com proposta de FMEA associado à Teoria *Gray* (CHANG; LIU; WEI, 2001); estudo da gestão de riscos de softwares com a associação de FMEA com Lógica *Fuzzy* (PUENTE *et al.*, 2002) e aplicação de FMEA para melhorias em gestão da produção em indústria de semicondutores (YANG *et al.*, 2006).

Tabela 11 - Referência para pontuação de Ocorrência pela possibilidade de falha

| <b>Critério</b>         | <b>Pontuação</b> | <b>Possibilidade de ocorrência da falha</b> |
|-------------------------|------------------|---------------------------------------------|
| Chance remota de falha  | 1                | 0                                           |
| Baixa razão de falha    | 2                | 1/20000                                     |
|                         | 3                | 1/10000                                     |
|                         | 4                | 1/2000                                      |
| Moderada razão de falha | 5                | 1/1000                                      |
|                         | 6                | 1/200                                       |
|                         | 7                | 1/100                                       |
| Alta razão de falha     | 8                | 1/20                                        |
|                         | 9                | 1/10                                        |
|                         | 10               | 1/2                                         |

Fonte: (BEN-DAYA; RAOUF, 1996; CHANG; LIU; WEI, 2001; PUENTE *et al.*, 2002; YANG *et al.*, 2006)

Na aplicação de FMEA do estudo de caso de uma indústria de papel apresentado por Sharma, Kumar e Kumar (2005), a pontuação de Ocorrência é atribuída de acordo com uma referência em cinco níveis baseada no tempo médio entre falhas. Este critério, apresentado na Tabela 12, também é utilizado por Braglia (2000), na aplicação de um modelo de decisão multi-atributo associado ao FMEA em uma empresa italiana de produção de frigoríficos.

Tabela 12 - Referência para pontuação de Ocorrência baseada no tempo médio entre falhas

| Avaliação da probabilidade de ocorrência | Tempo médio entre falhas (MTBF) | Pontuação | Razão de ocorrência (%) |
|------------------------------------------|---------------------------------|-----------|-------------------------|
| Remota                                   | > 10 anos                       | 1         | < 0,01                  |
| Baixa                                    | 2 - 10 anos                     | 2 - 3     | 0,01 - 0,1              |
| Moderada                                 | 6 meses - 2 anos                | 4 - 6     | 0,1 - 0,5               |
| Alta                                     | 3 - 6 meses                     | 7 - 8     | 0,5 - 1                 |
| Muito alta                               | < 3 meses                       | 9 - 10    | > 1                     |

Fonte: (BRAGLIA, 2000; SHARMA; KUMAR; KUMAR, 2005)

Tanto Braglia, Fantoni e Frosolini (2007), com o estudo de FMEA associado ao QFD para o mapeamento de falhas e respectivos custos envolvidos, durante um novo ciclo de desenvolvimento de produtos, quanto Dong (2007), com a aplicação da Lógica *Fuzzy* em FMEA também para estimativa de custos, a pontuação de ocorrência é atribuída de acordo com a referência apresentada na Tabela 13, com a probabilidade da ocorrência considerada a cada mil peças produzidas com comentários adicionais em níveis intermediários.

Tabela 13 - Referência para pontuação de Ocorrência baseada na provável taxa de falha com base referencial de mil peças

| Probabilidade                       | Provável Taxa de Falha       | Ranking |
|-------------------------------------|------------------------------|---------|
| Muito Alta: Falhas persistentes     | ≥ 100 por lote de mil peças  | 10      |
|                                     | 50 por lote de mil peças     | 9       |
| Alta: Frequentes Falhas             | 20 por lote de mil peças     | 8       |
|                                     | 10 por lote de mil peças     | 7       |
|                                     | 5 por lote de mil peças      | 6       |
| Moderada: Falha Ocasional           | 2 por lote de mil peças      | 5       |
|                                     | 1 por lote de mil peças      | 4       |
| Baixa: Falhas relativamente menores | 0,5 por lote de mil peças    | 3       |
|                                     | 0,1 por lote de mil peças    | 2       |
| Remota: Falha é improvável          | ≤ 0,01 por lote de mil peças | 1       |

Fonte: (BRAGLIA; FANTONI; FROSOLINI, 2007; DONG, 2007)

Kmenta e Ishii (2000) apresentam a aplicação de FMEA na definição da perspectiva de custo de ciclo de vida de produtos, onde, em um estudo com o produto secador de cabelo manual, para a determinação do valor da Ocorrência, utilizam uma referência de atribuição de valores em dez níveis baseada na taxa de falha com base referencial a partir da ocorrência em uma peça e comentários adicionais em determinados níveis intermediários. Esta referência, também adotada por Du *et al.* (2014) em uma aplicação de FMEA com regras específicas para a avaliação dos fatores de risco. A Tabela 14 apresenta a referência para pontuação de Ocorrência baseada na taxa de falha com base referencial a partir da ocorrência em uma peça.

Tabela 14 - Referência para pontuação de Ocorrência baseada na taxa de falha com base referencial a partir da ocorrência em uma peça

| Probabilidade de Falha               | Taxas de Falha | Ocorrência |
|--------------------------------------|----------------|------------|
| Muito Alta: Falha é quase inevitável | $\geq 1$ em 2  | 10         |
|                                      | 1 em 3         | 9          |
|                                      | 1 em 8         | 8          |
| Alta: Repetidas Falhas               | 1 em 20        | 7          |
|                                      | 1 em 80        | 6          |
|                                      | 1 em 400       | 5          |
| Moderada: Falha Ocasional            | 1 em 2000      | 4          |
|                                      | 1 em 15000     | 3          |
|                                      | 1 em 150000    | 2          |
| Baixa: Falhas relativamente menores  | 1 em 1500000   | 1          |
|                                      |                |            |
| Remota: Falha improvável             |                |            |

Fonte: (DU *et al.*, 2014; KMENTA; ISHII, 2000)

O Manual de FMEA publicado pela AIAG (2008) apresenta como referência para a atribuição de valores de Ocorrência em FMEA uma abordagem de acordo com índice de incidentes a cada mil veículos, conforme apresentado na Tabela 15. Esta proposta também indica, adicionalmente, esta proporção a partir da ocorrência em uma peça em relação à determinada população, com comentários da probabilidade da falha em níveis intermediários, desde muito baixa para pontuação igual a um, até muito alta para pontuação igual a dez.

Tabela 15 - Referência para valores de Ocorrência a partir do número de incidentes por itens ou veículos

| Probabilidade de Falha | Crítérios: Ocorrência de Causa - PFMEA<br>(Incidentes por itens/veículos) | Classificação |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Muito Alta</b>      | $\geq 100$ por mil                                                        | 10            |
|                        | $\geq 1$ em 10                                                            |               |
| <b>Alta</b>            | 50 por mil                                                                | 9             |
|                        | 1 em 20                                                                   |               |
|                        | 20 por mil                                                                | 8             |
|                        | 1 em 50                                                                   |               |
|                        | 10 por mil                                                                | 7             |
|                        | 1 em 100                                                                  |               |
| <b>Moderada</b>        | 2 por mil                                                                 | 6             |
|                        | 1 em 500                                                                  |               |
|                        | 0,5 por mil                                                               | 5             |
|                        | 1 em 2.000                                                                |               |
|                        | 0,1 por mil                                                               | 4             |
|                        | 1 em 10.000                                                               |               |
| <b>Baixa</b>           | 0,01 por mil                                                              | 3             |
|                        | 1 em 100.000                                                              |               |
|                        | $\leq 0,001$ por mil                                                      | 2             |
|                        | 1 em 1.000.000                                                            |               |
| <b>Muito Baixa</b>     | A falha é eliminada por meio de controle preventivo.                      | 1             |

Fonte: AIAG (2008)

Tay e Lim (2006), num estudo que envolve FMEA e Lógica *Fuzzy* em processo de fabricação de semicondutores, sugerem uma referência para pontuação de Ocorrência em dez níveis baseada na escala de ocorrência dentro de um determinado período de tempo, sendo desde uma vez por ano para pontuação igual a um, até uma condição extrema de muitas vezes por turno, com pontuação igual a dez, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Referência para pontuação de Ocorrência baseada na escala de ocorrência dentro de um determinado período de tempo

| <b>Tabela Escala de Ocorrência</b> |                                             |                         |
|------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------|
| <b>Pontuação</b>                   | <b>Termos / interpretações Linguísticas</b> | <b>Critério</b>         |
| 10                                 | Muito Alta                                  | Muitas vezes por turno  |
| 9                                  |                                             | Muitas vezes por dia    |
| 8                                  | Alta                                        | Muitas vezes por semana |
| 7                                  |                                             | Poucas vezes por semana |
| 6                                  | Moderada                                    | Uma vez por semana      |
| 5                                  |                                             | Várias vezes por mês    |
| 4                                  |                                             | Poucas vezes por mês    |
| 3                                  | Baixa                                       | Uma vez por mês         |
| 2                                  | Muito Baixa                                 | Uma vez por trimestre   |
| 1                                  | Remota                                      | Uma vez por ano         |

Fonte: (TAY; LIM, 2006)

Assim como para a pontuação de Severidade, o estudo de implantação de um sistema a prova de erro com base no FMEA em um ambiente hospitalar, proposto por Terninko (2003), utiliza uma tabela de referência para atribuição de valores de Ocorrência bem simples, com base na taxa de ocorrência a cada milhão de oportunidades, conforme apresentado na Tabela 17.



Tabela 17 - Referência para pontuação de Ocorrência relacionada com a razão de ocorrência a cada um milhão de oportunidades

| Razão de ocorrência  |                |
|----------------------|----------------|
| 1. Quase Nunca       | $3/10^6$       |
| 2. Remota            | $100/10^6$     |
| 3. Muito Desprezível | $1000/10^6$    |
| 4. Desprezível       | $10,000/10^6$  |
| 5. Baixa             | $150,000/10^6$ |
| 6. Média             | $300,000/10^6$ |
| 7. Moderada Alta     | $400,000/10^6$ |
| 8. Alta              | $500,000/10^6$ |
| 9. Muito Alta        | $666,667/10^6$ |
| 10. Quase Certa      | $900,000/10^6$ |

Fonte: (TERNINKO, 2003)

Uma referência composta por sete níveis de pontuação, sendo quatro destes associados a dois valores, é apresentada na Tabela 18. Tal referência apresenta critérios de taxa de falha anual e é sugerida por Yang, Bonsall e Wang (2008), na proposta de definição de regras para recomendação ações em NPR baseada a partir de lógica *Fuzzy* na indústria naval.

Tabela 18 - Referência para pontuação de ocorrência a partir de critérios para taxa de falha anual

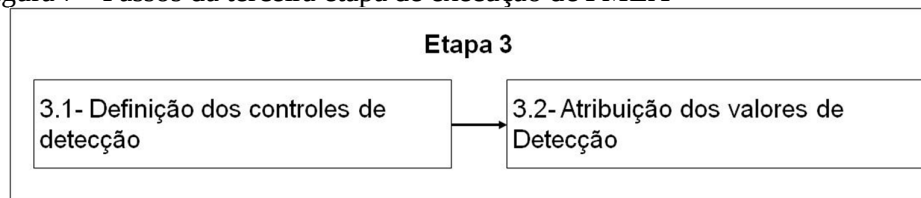
| Número de Preferência | Taxa de Falha           | Significado                                                       | Taxa de Falha (1/ano) |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 1, 2                  | Muito Baixa             | Falha é improvável, mas possível durante a vida.                  | $<10^{-6}$            |
| 3, 2                  | Baixa                   | Provável para acontecer uma vez na vida.                          | $0,25 \cdot 10^{-5}$  |
| 4                     | Razoavelmente Baixa     | Entre baixa e média.                                              | $0,25 \cdot 10^{-4}$  |
| 6, 5                  | Média                   | Falha Ocasional.                                                  | $10^{-3}$             |
| 7                     | Razoavelmente Frequente | Provável para acontecer ao longo do tempo.                        | $0,25 \cdot 10^{-2}$  |
| 8                     | Frequente               | Falha repetida.                                                   | $0,125 \cdot 10^{-1}$ |
| 9, 10                 | Altamente Frequente     | Falha é quase inevitável, ou provável de acontecer repetidamente. | $>0,25 \cdot 10^{-1}$ |

Fonte: (YANG; BONSALL; WANG, 2008)

### 2.2.3. Etapa 3 e a pontuação de Detecção

Na sequência, são definidos os controles de detecção (OOKALKAR; JOSHI; OOKALKAR, 2009). Diferente dos controles de prevenção, os controles de detecção são aqueles com a função de detectar os modos de falha (TANIK, 2010), e formam base para a definição da pontuação de Detecção. A Detecção está relacionada à probabilidade de uma falha ser detectada (FEILI *et al.*, 2013), sendo que quanto maior for capacidade de controle do processo, maior é a probabilidade de detecção (HAEFNER *et al.*, 2014). A chance de detectar uma falha depende de vários fatores, tais como capacidade de operador ou pessoal de manutenção para detectar a falha ao olho nu ou por meio de inspeção periódica ou com a ajuda de meios auxiliares de diagnóstico da máquina, como automatismos, alarmes e sensores (SHARMA; KUMAR; KUMAR, 2007). A pontuação de Detecção reflete a chance de determinada falha não ser detectada (LIU *et al.*, 2014b), sendo assim inversamente proporcional ao poder de detecção, ou seja, quanto maior o valor da Detecção, maior a chance da falha não ser detectada. A Figura 7 apresenta a sequência dos dois passos que compõem a terceira Etapa de execução do FMEA.

Figura 7 - Passos da terceira etapa de execução de FMEA



Fonte: (AGUIAR; SALOMON, 2007)

Uma das formas mais práticas de se determinar a pontuação de Detecção se dá a partir da probabilidade de um defeito chegar ao cliente, entretanto é preciso considerar que dentro desta probabilidade está incluída a probabilidade da ocorrência da falha, o que nem sempre é muito simples de se extrair com exatidão. Mesmo com este aspecto desfavorável, este formato para pontuação de Detecção, apresentado na Tabela 19 tem sido amplamente adotado, que é o caso dos estudos apresentados por Ben-Daya e Raoulf (1996) numa aplicação de FMEA com base em análise de custo em processo de mineração; Chang, Liu e Wei (2001) na proposta de FMEA associado à Teoria Gray aplicada em painéis elétricos automotivos; Puente *et al.* (2002) aplicam FMEA associado à Teoria Gray em painéis elétricos automotivos; Sharma, Kumar e Kumar (2005) na aplicação integrada de FMEA e lógica Fuzzy em uma indústria de

papel e ainda Yang *et al.* (2006) que aplicam FMEA na indústria de semicondutores em Taiwan.

Tabela 19 - Referência para pontuação de Detecção a partir da probabilidade de um defeito chegar ao cliente

| <b>Critério</b> | <b>Pontuação</b> | <b>Probabilidade de um defeito chegar ao cliente</b> |
|-----------------|------------------|------------------------------------------------------|
| Remota          | 1                | 0-5                                                  |
| Baixa           | 2                | 6-16                                                 |
|                 | 3                | 16-25                                                |
|                 | 4                | 26-35                                                |
| Moderada        | 5                | 36-45                                                |
|                 | 6                | 46-55                                                |
|                 | 7                | 56-65                                                |
| Alta            | 8                | 66-75                                                |
|                 | 9                | 76-85                                                |
| Muito alta      | 10               | 86-100                                               |

Fonte: (BEN-DAYA; RAOUF, 1996; CHANG; LIU; WEI, 2001; PUENTE *et al.*, 2002; SHARMA; KUMAR; KUMAR, 2005; YANG *et al.*, 2006)

A referência para pontuação de Detecção apresentada na Tabela 20 é sugerida por Braglia (2000) em seu estudo de um modelo de decisão multi-atributo associado ao FMEA em uma indústria frigorífica. Tal referência associa a possibilidade de detecção em quatro diferentes tipos de intervenção no processo, sendo: Visível a olho nu; Controlável via diário de bordo; Visível após uma inspeção e Inspeção periódica. As associações do nível de atendimento a cada um destes quatro tipos de intervenção com a combinação da aplicação dos mesmos formam treze diferentes combinações de pontuação de Detecção, sendo com valor mínimo igual a um e máximo igual a dez e em alguns casos com o mesmo valor, a pesar de diferentes combinações.

Tabela 20 - Referência para a pontuação de Detecção a partir da combinação de controles

| Visível a olho nu |         |     | Controlável via diário de bordo |          |     | Visível após uma inspeção |     | Inspeção periódica |     | Pontuação |
|-------------------|---------|-----|---------------------------------|----------|-----|---------------------------|-----|--------------------|-----|-----------|
| Sim               | Parcial | Não | Direta                          | Indireta | Não | Sim                       | Não | Sim                | Não |           |
| X                 |         |     |                                 |          |     |                           |     |                    |     | 1         |
|                   |         | X   | X                               |          |     |                           |     |                    |     | 1         |
|                   | X       |     |                                 | X        |     | X                         |     |                    |     | 2         |
|                   |         | X   |                                 | X        |     | X                         |     | X                  |     | 3         |
|                   |         | X   |                                 |          |     | X                         |     |                    | X   | 4         |
|                   | X       |     |                                 | X        |     |                           | X   | X                  |     | 5         |
|                   |         | X   |                                 |          |     |                           | X   | X                  |     | 5         |
|                   | X       |     |                                 | X        |     |                           | X   |                    | X   | 6         |
|                   |         | X   |                                 |          |     |                           | X   |                    | X   | 6         |
|                   |         | X   |                                 |          | X   |                           |     | X                  |     | 7         |
|                   |         | X   |                                 |          | X   | X                         |     |                    | X   | 8         |
|                   |         | X   |                                 |          | X   | X                         | X   | X                  |     | 9         |
|                   |         | X   |                                 |          | X   |                           | X   |                    | X   | 10        |

Fonte: (BRAGLIA, 2000)

A Tabela 21 apresenta uma referência para atribuição de valores de Detecção bastante simples. Assim como no caso da Severidade e da Ocorrência, a referência para Detecção proposta por Chang, Chang e Tsai (2013), na aplicação de FMEA em avaliações de ensaios laboratoriais, deixa de apresentar qualquer tipo de descrição do critério de classificação. Barends *et al.*(2012), numa aplicação de FMEA na área farmacêutica e Braglia, Fantoni e Frosolini (2007), também sugerem esta referência.

Tabela 21 - Referência para pontuação da Detecção sem descrição da classificação

| Nível | Detecção           |
|-------|--------------------|
| 1     | Quase Certo        |
| 2     | Muito Alta         |
| 3     | Alta               |
| 4     | Moderadamente Alta |
| 5     | Média              |
| 6     | Baixa              |
| 7     | Leve               |
| 8     | Muito Leve         |
| 9     | Remota             |
| 10    | Quase Impossível   |

Fonte: (BARENDTS *et al.*, 2012; BRAGLIA; FANTONI; FROSOLINI, 2007; CHANG; CHANG; TSAI, 2013)

Em uma aplicação de FMEA associada ao QFD em funções de uma lâmpada incandescente, Fernandes e Rebelato (2006) referenciam a atribuição de valores de Detecção a

partir de uma atuação na causa da falha. De acordo com o que tem sido exposto no embasamento teórico, a atuação na causa da falha se dá com o controle de prevenção, sendo a medição pelo fator de Ocorrência. Tal referência classifica a Detecção em dez níveis, desde quase certa para pontuação igual a um, até absolutamente incerta para pontuação igual a dez, abordando, em alguns casos, ações relacionadas à manutenção conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Referência para pontuação de Detecção com foco na causa da falha

| <b>Detecção</b>       | <b>Probabilidade de detecção da causa da falha</b>              | <b>Pontuação</b> |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------|
| Absolutamente incerta | A manutenção não detecta a causa da falha, ou não há manutenção | 10               |
| Muito remota          | Chance muito remota de se detectar a causa da falha             | 9                |
| Remota                | Chance remota de se detectar a causa da falha                   | 8                |
| Muito Baixa           | Chance muito baixa de se detectar a causa da falha              | 7                |
| Baixa                 | Chance baixa de se detectar a causa da falha                    | 6                |
| Moderada              | Moderada chance de se detectar a causa da falha                 | 5                |
| Moderadamente alta    | Moderadamente alta a chance de se detectar a causa da falha     | 4                |
| Alta                  | Chance alta de se detectar a causa da falha                     | 3                |
| Muito alta            | Chance muito alta de se detectar a causa da falha               | 2                |
| Quase certa           | A manutenção quase certamente detectará a causa da falha.       | 1                |

Fonte: (FERNANDES; REBELATO, 2006)

O Manual de FMEA publicado pela AIAG, (2008) apresenta como referência para a atribuição de valores de Detecção uma abordagem a partir da definição da oportunidade de detecção, bem como probabilidade de detecção, conforme apresentado na Tabela 23. Esta referência apresenta ainda uma breve descrição do controle do processo, porém com diversas situações orientando um direcionamento para a causa, quando cita a prevenção do erro.

Tabela 23 - Referência para pontuação de Detecção a partir da definição da oportunidade e probabilidade de Detecção

| Oportunidade para Detecção                  | Crítérios: Probabilidade de Detecção por Controle de Processo                                                                                                                                                                                                                                                                | Classificação | Probabilidade de Detecção |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------------|
| Nenhuma oportunidade de detecção            | Nenhum controle de processo. Não se pode detectar, ou não está analisado.                                                                                                                                                                                                                                                    | 10            | Praticamente Impossível   |
| Improvável detectar em qualquer estágio     | Modo de falha e/ou Erro (Causa) não é facilmente detectável (por exemplo, auditorias aleatórias)                                                                                                                                                                                                                             | 9             | Muito Remota              |
| Detecção do Problema Pós-Processamento      | Detecção do modo de falha pós-processamento, pelo operador, através de meios visuais / táteis / audíveis                                                                                                                                                                                                                     | 8             | Remota                    |
| Detecção do Problema na Origem              | Detecção do modo de falha, na estação, pelo operador, através de meios visuais / táteis / audíveis, ou pós-processamento, através do uso de medição por atributo (passa/não passa, verificação de torque manualmente/por chave de estalo etc.).                                                                              | 7             | Muito Baixa               |
| Detecção do Problema Pós-Processamento      | Detecção do modo de falha, pós processamento pelo operador, através do uso de medição por variável, ou na estação, pelo operador, através do uso de medição por atributo (passa/não-passa, verificação de torque manualmente/por chave de estalo etc.).                                                                      | 6             | Baixa                     |
| Detecção do Problema na Origem              | Detecção do modo de falha ou Erro (Causa) na estação, pelo operador, através do uso de medição variável, ou por controles automáticos na estação, que detectarão peças discrepantes e notificarão o operador (luz, campainha etc.). Medição realizada no setup e verificação da primeira peça (somente por causas de setup). | 5             | Moderada                  |
| Detecção do Problema Pós-Processamento      | Detecção do modo de falha pós-processamento, por controles automáticos, que detectarão peças discrepantes e travarão a peça, para impedir processamento subsequente.                                                                                                                                                         | 4             | Moderadamente Alta        |
| Detecção do Problema na Origem              | Detecção do modo de falha na estação, por controles automáticos, que detectarão peças discrepantes e automaticamente travarão a peça na estação, para impedir processamento subsequente.                                                                                                                                     | 3             | Alta                      |
| Detecção de Erro e/ou Prevenção do Problema | Detecção de Erro (Causa), na estação, por controles automáticos, que detectarão o erro e impedirão que a peça discrepante seja produzida.                                                                                                                                                                                    | 2             | Muito Alta                |
| Detecção não aplicável. Prevenção do Erro.  | Prevenção de Erro (Causa) como resultado do projeto do dispositivo de fixação, projeto da máquina, ou projeto da peça. Peças discrepantes não podem ser produzidas porque o item foi tornado à prova de erro, pelo projeto do processo/produto.                                                                              | 1             | Praticamente Certa        |

Fonte: AIAG (2008)

A Tabela 24 apresenta uma referência para os valores de Detecção com base no índice da possibilidade de detecção da falha e frequência. Esta abordagem é proposta por Tanik (2010) em um estudo que envolve a integração de FMEA e QFD em um processo de embalagem de alimentos.

Tabela 24 - Referência para pontuação de Detecção com base no índice da possibilidade de detecção da falha e frequência

| Pontuação | Detecção                                       | Frequência (%) |
|-----------|------------------------------------------------|----------------|
| 10        | Nenhuma chance de detecção de falha.           | 90             |
| 9         | 1/1000 de possibilidade de detecção de falha.  | 70             |
| 8         | 1/100 de possibilidade de detecção de falha.   | 50             |
| 7         | 5/100 de possibilidade de detecção de falha.   | 40             |
| 6         | 10/100 de possibilidade de detecção de falha.  | 30             |
| 5         | 20/100 de possibilidade de detecção de falha.  | 20             |
| 4         | 50/100 de possibilidade de detecção de falha.  | 10             |
| 3         | 70/100 de possibilidade de detecção de falha.  | 5              |
| 2         | 80/100 de possibilidade de detecção de falha.  | 1              |
| 1         | 100/100 de possibilidade de detecção de falha. | 0,1            |

Fonte: (TANIK, 2010)

Uma proposta para referência de pontuação de Detecção, baseada em seis níveis, é apresentada na Tabela 25. Os valores a serem atribuídos estão no intervalo de um a dez, entretanto para quatro dos níveis, existe a possibilidade de mais de uma opção de valor. Esta referencia proposta por Tay e Lim (2006), em um estudo que envolve uma interação entre FMEA e Lógica *Fuzzy* no processo de fabricação de semicondutores, também envolve comentários orientativos a respeito da disponibilidade e da capacidade dos controles em detectar falhas.

Tabela 25 - Referência para pontuação da Detecção a partir de escala de seis níveis

| <b>Pontuação</b> | <b>Interpretações Linguísticas</b> | <b>Critério</b>                                                                           |
|------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10               | Extremamente Baixa                 | Controle não disponíveis.                                                                 |
| 9                | Muito Baixa                        | Controle provavelmente não irá detectar.                                                  |
| 8, 7             | Baixa                              | Controle pode não detectar falhas até chegar próxima a área funcional.                    |
| 6, 5             | Moderada                           | Controle são capazes de detectar no interior da mesma área funcional.                     |
| 4, 3             | Alta                               | Controle são capazes de detectar dentro da mesma máquina/módulo.                          |
| 2, 1             | Muito Alta                         | Controle irá detectar falhas antes do próximo lote produzido. Previne que falhas ocorram. |

Fonte: (TAY; LIM, 2006)

Terninko (2003) sugere em estudo de implantação de um sistema a prova de erro com base no FMEA em processos hospitalares, uma referência para atribuição de valores de Detecção conforme apresentado na Tabela 26, com dez níveis de pontuação baseado no índice de frequência de detecção e comentários adicionais em três dos dez níveis.

Tabela 26 - Referência para pontuação da Detecção com base na frequência

| <b>Frequência de detecção</b> | <b>Frequência de detecção</b> | <b>Desempenho do controle</b>     |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Quase Certa                | 900,000/10 <sup>6</sup>       | 1. Detectado antes do problema    |
| 2. Muito Alta                 | 666,667/10 <sup>6</sup>       | 2.                                |
| 3. Alta                       | 500,000/10 <sup>6</sup>       | 3.                                |
| 4. Moderadamente Alta         | 400,000/10 <sup>6</sup>       | 4.                                |
| 5. Média                      | 300,000/10 <sup>6</sup>       | 5. Possibilidade de plano de ação |
| 6. Baixa                      | 100,000/10 <sup>6</sup>       | 6.                                |
| 7. Desprezível                | 10,000/10 <sup>6</sup>        | 7.                                |
| 8. Muito Desprezível          | 1000/10 <sup>6</sup>          | 8.                                |
| 9. Remota                     | 100/10 <sup>6</sup>           | 9.                                |
| 10. Quase Impossível          | 900,000/10 <sup>6</sup>       | 10. Ocorrência de catástrofe      |

Fonte: (TERNINKO, 2003)

Uma referência para atribuição de valores de Detecção, composta por sete níveis de pontuação, sendo três destes associados a dois valores, é apresentada na Tabela 27. Tal referência é sugerida por Yang, Bonsall e Wang (2008) e atua com base na probabilidade de consequência da falha, com explicações pertinentes a cada nível.



Tabela 27 - Referência para a pontuação da Detecção com base na probabilidade da consequência da falha

| Número de Preferência | Probabilidade de consequência de Falha | Significado                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10                    | Altamente Improvável                   | A probabilidade de ocorrência de possível consequência é altamente improvável, dada a ocorrência do evento de falha (extremamente improvável que existe no sistema ou durante as operações).                                                                                                      |
| 9,8                   | Improvável                             | A probabilidade de ocorrência de possíveis consequências é improvável, mas possível, uma vez que o evento de falha aconteça (improvável existir mesmo em raras ocasiões, sobre o sistema ou durante as operações).                                                                                |
| 7                     | Razoavelmente Improvável               | A probabilidade de ocorrência de possíveis consequências é razoavelmente improvável dada a ocorrência do evento de falha (que deveria existir em raras ocasiões, sobre o sistema ou durante as operações).                                                                                        |
| 6,5                   | Provável                               | É consequência provável acontecer dado que o evento de falha ocorra (um programa não é susceptível de detectar um projeto potencial ou operações de fraqueza processual).                                                                                                                         |
| 4                     | Razoavelmente provável                 | É razoavelmente provável que as consequências ocorrem devido à ocorrência do evento de falha (ou seja, existem ao longo do tempo no sistema ou durante as operações, possivelmente causadas por um design potencial ou operações fraqueza processual).                                            |
| 3                     | Altamente Provável                     | É altamente provável que as consequências ocorrem devido à ocorrência do evento de falha (ou seja, muitas vezes existe em algum lugar do sistema ou durante as operações, devido a uma situação de perigo potencial altamente provável, ou um desenho e / ou operações não conforme no processo). |
| 2,1                   | Definitivo                             | Possíveis consequências aconteçam, dada a ocorrência de um evento de falha (ou seja, provável que existam várias vezes durante as operações devido a um potencial de criação e operações não conforme no processo).                                                                               |

Fonte: (YANG; BONSALL; WANG, 2008)

#### 2.2.4. Etapa 4 e a priorização de ações

Esta sequência de pontuações para Severidade, Ocorrência e Detecção aplicada no FMEA atribui um peso a cada modo de falha em análise (SILVESTRI; DE FELICE; PETRILLO, 2012). Os dados de Número de Prioridade de Risco, ou NPR, formam o produto das taxas de Severidade, Ocorrência e Detecção (ESTORILIO; POSSO, 2010; SANKAR; PRABHU, 2001), conforme Equação 1.

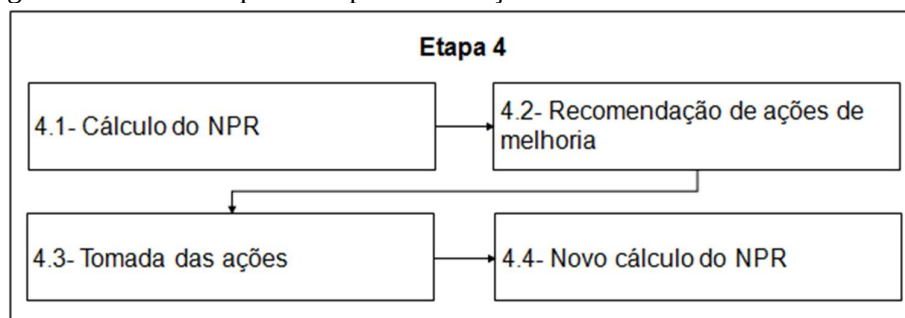
$$NPR = S \times O \times D \quad (1)$$

O NPR tem como finalidade indicar os pontos prioritários para a recomendação de ações de melhoria (BRAGLIA; FANTONI; FROSOLINI, 2007), de modo que os recursos disponíveis possam ser aplicados de forma eficaz, em termos de esforço, tempo e custo (MANDAL; MAITI, 2014). Tanik (2010) relata que os altos valores de NPR são interpretados como modos de falha potenciais que exigirão maior atenção da equipe. O NPR forma a base para a classificação do risco e também para a priorização de ações, ajudando os gestores a tomar decisões (SILVESTRI; DE FELICE; PETRILLO, 2012). Quanto maior o valor de NPR, maior é o risco associado ao modo de falha correspondente (MANDAL; MAITI, 2014) e, para os modos de falha com NPR além do nível de valor limite determinado, devem ser recomendadas ações para melhorias no processo (KESKIN; ÖZKAN, 2009). Murphy, Heaney e Perera (2011) afirmam que aos modos de falha com maior NPR são dadas prioridades em comparação com os com menor NPR. Por outro lado, Sawhney *et al.* (2010) esclarecem que para os valores menores de NPR, por menos urgente que sejam, a recomendação de ação ainda pode ser necessária.

Com base nesta avaliação de risco, é esperado que sejam recomendadas as ações necessárias para reduzir a ocorrência das principais causas da falha (BAHRAMI; BAZZAZ; SAJJADI, 2012), aumentando assim a confiabilidade do processo. O objetivo da recomendação de ações é eliminar ou minimizar os modos de falha críticos que mostram uma alta pontuação de NPR. De acordo com Puente *et al.* (2002), há quatro formas para que tais ações atuem para a redução do NPR, priorizadas na seguinte sequência: Eliminação da causa da falha; Redução da Ocorrência da causa da falha; Redução da Severidade do efeito da falha; Aumento da probabilidade de Detecção da falha. Sendo que a redução da Severidade do efeito da falha está relacionada à revisão de projeto, o que na maioria dos casos não está dentro do campo de atuação da equipe responsável pelo FMEA.

Tais ações são analisadas quanto à viabilidade e, em seguida, aquelas que podem ser implantadas são determinadas. Uma forma de controlar o resultado dessas medidas é pelo formulário FMEA, por meio de colunas, onde são registradas as ações recomendadas pelo grupo, nome do responsável e duração (SANT'ANNA, 2012). O valor de NPR deve ser recalculado após a implementação das ações para determinar se os riscos diminuiram ou mesmo a eficiência da ação (XIAO *et al.*, 2011). A Figura 8 apresenta a sequência dos quatro passos que compõem a quarta Etapa de execução do FMEA.

Figura 8 - Passos da quarta etapa de execução de FMEA



Fonte: (AGUIAR; SALOMON, 2007)

Uma vez concluído do FMEA, uma lista de itens de maior NPR é compilada permitindo que seja possível identificar as maiores vulnerabilidades e priorização das ações (SANKAR; PRABHU, 2001).

### 2.3. ESTRUTURA PARA CONSTRUÇÃO DO FMEA

Adicionalmente à execução dividida em quatro Etapas, o FMEA pode ser dividido em três fases distintas, classificadas quanto ao tipo de análise a ser realizada pela equipe, na seguinte sequência: Estrutura para a construção do FMEA; Pontuação e Priorização e Decisão e Ação (KMENTA; ISHII, 2000; LEE, 2001).

Na estrutura para construção do FMEA, são tratadas das análises referentes àquilo que será pontuado, envolvendo todos os desdobramentos para definição Modo de Falha e Efeito; Causas e Controles de Prevenção; além dos Controles de Detecção. Na fase de pontuação, as análises estão atreladas às atribuições de valores de Severidade, Ocorrência e Detecção aos elementos da fase anterior: Efeito, Causa e Modo de Falha, respectivamente. Já na fase de Decisão e Ação, as análises estão relacionadas à priorização das ações a serem recomendadas para melhorias no processo. Estas três fases de análises podem ser classificadas como análise qualitativa, análise quantitativa e análise corretiva (PACIAROTTI *et al.*, 2014), estando

baseadas respectivamente na identificação de todos os modos de falha potenciais, causas e efeitos; na formação do índice NPR, e na implementação de estratégias de melhoria, a fim de reduzir o nível de risco. Estas fases e suas descrições são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Estrutura para construção do FMEA de acordo com o tipo de análise

| <b>Análise do FMEA</b>             | <b>Classificação</b> | <b>Descrição</b>                                                                                                            |
|------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1- Construção do modelo estrutural | Qualitativa          | Elaboração da "cadeia causal" de dependências da falha (Causas -> Modos de Falha -> Efeitos)                                |
| 2- Pontuação e priorização         | Quantitativa         | Avaliação dos números de prioridade de risco (NPR) (Severidade do Efeito X Ocorrência das Causas X Dificuldade de Detecção) |
| 3- Decisão e Ação                  | Corretiva            | Otimização de melhorias no processo, mudanças nos controles, etc.                                                           |

Fonte: (KMENTA; ISHII, 2000; LEE, 2001; PACIAROTTI *et al.*, 2014)

Os 14 Passos apresentados nas Figuras de 5 a 8, que representam as Etapas de execução do FMEA, podem ser classificados de acordo com o tipo de análise apresentado no Quadro 1, logo, sendo possível relacionar os tipos de análise que ocorrem em cada Etapa de execução do FMEA. Desta forma, sete dos 14 passos está atrelada às análises que envolvem a construção do modelo estrutural do FMEA, sendo quatro relacionadas à Etapa 1, dois relacionados à Etapa 2 e um relacionado à Etapa 3. São quatro os Passos relacionados às análises referentes à atribuição de valores, um em cada Etapa de execução do FMEA. Já nas análises de decisão e ação, três passos estão relacionados, todos na Etapa 4. O Quadro 2 apresenta a classificação dos Passos em relação ao tipo de análise realizada pela equipe de FMEA.

Quadro 2 - Classificação dos Passos em relação ao tipo de análise do FMEA

| Análise do FMEA   |           |                | Passos para execução do FMEA                                              |
|-------------------|-----------|----------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Modelo Estrutural | Pontuação | Decisão e Ação |                                                                           |
| X                 |           |                | 1.1 Mapeamento do processo                                                |
| X                 |           |                | 1.2 Desmembramento da função de cada etapa do processo                    |
| X                 |           |                | 1.3 Identificação dos modos de falha                                      |
| X                 |           |                | 1.4 Identificação dos efeitos aos olhos do cliente                        |
|                   | X         |                | 1.5 Atribuição dos valores de Severidade e identificação da classificação |
| X                 |           |                | 2.1 Identificação das causas                                              |
| X                 |           |                | 2.2 Definição dos controles de prevenção                                  |
|                   | X         |                | 2.3 Atribuição dos valores de Ocorrência                                  |
| X                 |           |                | 3.1 Definição dos controles de detecção                                   |
|                   | X         |                | 3.2 Atribuição dos valores de Detecção                                    |
|                   | X         |                | 4.1 Cálculo de NPR                                                        |
|                   |           | X              | 4.2 Recomendação de ações de melhoria                                     |
|                   |           | X              | 4.3 Tomada das ações                                                      |
|                   |           | X              | 4.4 Novo cálculo de NPR                                                   |

Fonte: Adaptado de Aguiar e Salomon (2007)

## 2.4. DIFICULDADES EM RELAÇÃO AO FMEA

Mesmo sendo o FMEA muito utilizado nas áreas de confiabilidade e qualidade, vários problemas estão associados à sua implementação prática (BRAGLIA, 2000). Muitos autores têm destacado limitações relevantes à aplicação de FMEA, questionando sua confiabilidade e rigor teórico, bem como as vantagens que decorrem da sua utilização (CARMIGNANI, 2009). Alguns dos problemas estão relacionados a fatores como a programação de atividades do FMEA na fase de concepção, o estabelecimento de uma equipe qualificada, e dificuldades de coordenação. Embora, nos últimos anos, uma quantidade considerável de pesquisa tenha sido realizada para melhorar o desempenho de FMEA pela integração de técnicas adicionais (LIU *et al.*, 2015), estes métodos têm sido em sua maioria absoluta, propostos para melhorar o cálculo de NPR e, aparentemente não removendo os inconvenientes de um FMEA eficaz (BOZDAG *et al.*, 2015). Tais métodos são considerados para atuar em fragilidades que envolvem fatores como o peso, precisão, combinação entre outras situações atribuídas às pontuações para Severidade, Ocorrência e Detecção. Os tópicos seguintes apresentam breve explanação referente cada tipo de fragilidade que vem sendo explorada na literatura nos últimos anos.

A fragilidade mais explorada na literatura envolve a questão da atribuição de valores para Severidade, Ocorrência e Detecção considerarem o mesmo peso para os três fatores, ou seja, estes são considerados igualmente importantes (CHIN *et al.*, 2009a). Ao não levar em consideração a importância relativa entre eles, assume-se que os três atributos têm os mesmos pesos na determinação da prioridade das falhas (LIU *et al.*, 2014a; YANG; BONSALL; WANG, 2008). Assim, um valor três na escala de Severidade representa o mesmo nível de significância do valor três na escala de Ocorrência ou Detecção (BRADLEY; GUERRERO, 2011) sendo que em aplicações práticas, os fatores podem ter importâncias diferentes (DU *et al.*, 2014) por não possuir o mesmo peso em termos de risco (SANKAR; PRABHU, 2001). Como resultado, alguns cenários de NPR são mais baixos do que outras combinações, mas similarmente perigosas (SEYED-HOSSEINI; SAFAEI; ASGHARPOUR, 2006).

O fato de diferentes combinações para os valores de Severidade, Ocorrência e Detecção poderem produzir um valor idêntico de NPR, também vem sendo amplamente discutida na literatura. Várias combinações para os valores dos três índices podem indicar o mesmo nível de prioridade (AHSEN, 2008), no entanto, a implicação de risco pode ser totalmente diferente (LIU *et al.*, 2014b). Embora 1000 números sejam assumidos para serem produzidos a partir do produto de S, O e D, apenas 120 deles são únicos, havendo assim muitos números duplicados (CARMIGNANI, 2009). Por exemplo, dois diferentes eventos com os valores de três, quatro e três; e dois, nove e dois para Severidade, Ocorrência e Detecção, respectivamente, têm o mesmo valor de NPR 36 (SONG *et al.*, 2014). Assim, um NPR igual a 120 aparece 24 vezes a partir de diferentes combinações de Severidade, Ocorrência e Detecção (CHANG; SUN, 2009), o mesmo ocorre com NPR igual a 60 (BOZDAG *et al.*, 2015). Na verdade, diferentes combinações de fatores podem produzir o mesmo NPR e em 1000, apenas 120 números gerados são únicos (SILVESTRI, FELICE e PETRILLO, 2012), além disso, alguns números não podem ocorrer, por exemplo, 13, 17, 19, etc. (CHANG; SUN, 2009). Isso pode causar um desperdício de recursos e tempo, ou em alguns casos, um modo de falha de alto risco ser despercebido (CHIN *et al.*, 2009b; LIU *et al.*, 2011). Outro que ponto vale a pena mencionar é que alguns números entre um e 1000 não podem ser obtidos a partir do produto dos três fatores de risco, como é o caso de os números que têm um fator primo maior do que dez (KESKIN; ÖZKAN, 2009). Assim, em relação à combinação de resultados, o produto dos fatores de NPR pode produzir algumas lacunas (SILVESTRI, FELICE e PETRILLO, 2012), fortemente distribuídas na parte inferior da escala de um a 1000 (LIU *et al.*, 2014a). Estas lacunas são classificadas como propriedades estatísticas não-

intuitivas, que podem levar a suposições incorretas a respeito dos pontos intermediários das escalas (CHANG; SUN, 2009), gerando problemas ao interpretar o significado das diferenças entre os números de prioridade de risco (LIU *et al.*, 2014a). Esta fragilidade tem sido abordada na literatura como a distribuição desproporcional dos valores de NPR entre um e 1000.

Existem também dificuldades na precisão da avaliação da Severidade, Ocorrência e Detecção. Os três fatores são difíceis de determinar com exatidão (CHIN *et al.*, 2009b; DU *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2011). Esta dificuldade está relacionada à necessidade de se obter decisões numéricas precisas e diretas a partir de fatores qualitativos (BOZDAG *et al.*, 2015). Não há nenhuma regra exata para determinar a probabilidade de ocorrência e detecção (SEGISMUNDO; MIGUEL, 2008), além disso, muita informação em FMEA pode ser expressa de forma linguística tais como provável, importante ou muito elevada e assim por diante (CHIN *et al.*, 2009a; DU *et al.*, 2014). Como resultado, dois FMEAs compilados por diferentes autores, muitas vezes resultam em diferentes rotações para o mesmo modo de falha (CARMIGNANI, 2009).

Além dos questionamentos que envolvem o método de obtenção dos valores base para o cálculo do NPR, a própria fórmula matemática para o cálculo NPR é questionável e discutível (CHIN *et al.*, 2009a; DU *et al.*, 2014). A multiplicação adotada para o cálculo da prioridade da falha é fortemente sensível às variações nas avaliações do fator de criticidade (YANG; BONSALL; WANG, 2008), sendo carente de uma base científica completa (LIU *et al.*, 2014b), já que por ser um produto de escalas ordinais discretas de medida, não é significativo (CHANG; CHENG, 2010; RHEE; ISHII, 2003). Não há justificativa sobre o porquê da multiplicação dos três fatores para produzir o NPR (CHIN *et al.*, 2009a; DU *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2014b). A fórmula considera apenas três atributos e ignora outros possíveis fatores de influência (TAY; LIM, 2006), principalmente em termos de segurança (CHIN *et al.*, 2009a; MERAJ; FARHAD, 2015), além disso, o método não considera relações indiretas entre os componentes (MERAJ; FARHAD, 2015). Outro aspecto que vem sendo abordado na literatura está relacionado ao fato das escalas de Severidade, Ocorrência e Detecção serem apenas qualitativas, caracterizando uma fragilidade referente à conversão de pontuações ser diferente para os três fatores de risco. Uma análise pode ser feita considerando que pontuação de Severidade oito não é duas vezes uma pontuação de Severidade quatro na composição do NPR, no entanto, as multiplicações são tratadas como sendo quantidades numéricas

(CHANG; SUN, 2009). Além disso, a pontuação de Severidade pode não fornecer uma associação direta com o custo da falha, uma vez que o custo de um modo de falha com Severidade igual a dez não é sempre dez vezes maior que um caso de Severidade igual a um (DONG, 2007). Assim, a multiplicação pode ser classificada como uma combinação arbitrária de três fatores de pontuação (BRADLEY; GUERRERO, 2011). A distorção é agravada pela natureza não-linear de duas das escalas individuais de classificação (SANKAR; PRABHU, 2001), já que a Detecção corresponde a uma escala linear, porém a Severidade e a Ocorrência não respeitam esta linearidade (BEN-DAYA; RAOUF, 1996; PUENTE *et al.*, 2002). Num levantamento bibliográfico acerca das aplicações publicadas sobre FMEA, Liu *et al.* (2013) apresentam uma série de referências que tratam destas fragilidades, o Quadro 3 apresenta uma adaptação deste levantamento com os dados atualizados, a partir de uma busca em base de dados *Scopus* com a palavra chave FMEA no título.



Quadro 3 - Publicações que identificam as fragilidades mais exploradas na literatura

| Fragilidade                                                                                                | Publicações                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Total |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| A atribuição de valores para Severidade, Ocorrência e Detecção considera o mesmo peso para os três fatores | Bowles; Peláez (1995), Chang; Wei; Lee (1999), Chang; Liu; Wei (2001), Franceschini; Galetto (2001), Sankar; Prabhu (2001), Puente <i>et al.</i> (2002), Braglia; Frosolini; Montanari (2003a), Braglia; Frosolini; Montanari (2003b), Pillay; Wang (2003), Shahin (2004), Garcia; Schirru; Melo (2005), Sharma; Kumar; Kumar (2005), Seyed-Hosseini; Safaei; Asgharpour (2006), Tay; Lim (2006a), Tay; Lim (2006b), Sharma; Kumar; Kumar (2007a), Sharma; Kumar; Kumar (2007b), Sharma; Kumar; Kumar (2007c), Sharma; Kumar; Kumar (2007d), Ahsen (2008), Nepal <i>et al.</i> (2008), Sharma; Kumar; Kumar (2008a), Sharma; Kumar; Kumar (2008b), Sharma; Kumar; Kumar (2008c), Yang; Bonsall; Wang (2008), Carmignani (2009), Chang; Sun (2009), Chin <i>et al.</i> (2009a), Chin <i>et al.</i> (2009b), Keskin; Özkan (2009), Wang <i>et al.</i> (2009), Abdelgawad; Fayek (2010), Chang; Cheng (2010), Chang; Wen (2010), Chang; Cheng; Chang (2010), Sharma; Sharma (2010), Tay; Lim (2010), Chang; Cheng (2011), Gargama; Chaturvedi (2011), Liu <i>et al.</i> (2011), Xiao <i>et al.</i> (2011), Zhang; Chu (2011), Bradley; Guerrero (2011), Zammori; Gabbrielli (2012), Kutlu; Ekmekçioğlu (2012), Liu <i>et al.</i> (2012), Vinodh; Santhosh (2012), Hadi-Vencheh; Aghajani (2013), Netto; Honorato; Qassim (2013), Liu; Liu; Liu (2013), Liu <i>et al.</i> (2014), Song <i>et al.</i> (2014), Du <i>et al.</i> (2014), Vahdani; Salimi; Charkhchian (2014), Lolli <i>et al.</i> (2015), Liu <i>et al.</i> (2015), Meraj; Farhad (2015), Bozdog <i>et al.</i> (2015). | 58    |
| Diferentes valores para S, O e D podem gerar o mesmo NPR                                                   | Tabela 1 - Chang; Liu; Wei (2001), Franceschini; Galetto (2001), Sankar; Prabhu (2001), Puente <i>et al.</i> (2002), Braglia; Frosolini; Montanari (2003b), Pillay; Wang (2003), Shahin (2004), Garcia; Schirru; Melo (2005), Sharma; Kumar; Kumar (2005), Seyed-Hosseini; Safaei; Asgharpour (2006), Tay; Lim (2006a), Tay; Lim (2006b), Sharma; Kumar; Kumar (2007a), Sharma; Kumar; Kumar (2007b), Sharma; Kumar; Kumar (2007c), Sharma; Kumar; Kumar (2007d), Chen (2007), Ahsen (2008), Sharma; Kumar; Kumar (2008a), Sharma; Kumar; Kumar (2008b), Sharma; Kumar; Kumar (2008c), Yang; Bonsall; Wang (2008), Segismundo; Miguel (2008), Carmignani (2009), Chang; Sun (2009), Chin <i>et al.</i> (2009a), Chin <i>et al.</i> (2009b), Keskin; Özkan (2009), Wang <i>et al.</i> (2009), Chang (2009), Chang; Cheng (2010), Chang; Cheng; Chang (2010), Sharma; Sharma (2010), Chang; Cheng (2011), Gargama; Chaturvedi (2011), Liu <i>et al.</i> (2011), Zhang; Chu (2011), Silvestri; De Felice; Petrillo (2012), Kutlu; Ekmekçioğlu (2012), Liu <i>et al.</i> (2012), Vinodh; Santhosh (2012), Hadi-Vencheh; Aghajani (2013), Liu; Liu; Liu (2013), Liu <i>et al.</i> (2014), Song <i>et al.</i> (2014), Du <i>et al.</i> (2014), Vahdani; Salimi; Charkhchian (2014), Lolli <i>et al.</i> (2015), Liu <i>et al.</i> (2015), Meraj; Farhad (2015), Bozdog <i>et al.</i> (2015).                                                                                                                                                                                          | 51    |

Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2013)

Quadro 3 - Publicações que identificam as fragilidades mais exploradas na literatura (Continuação)

| Fragilidade                                                    | Publicações                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Total |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Distribuição desproporcional de valores de NPR entre um e 1000 | Franceschini; Galetto (2001), Sankar; Prabhu (2001), Garcia; Schirru; Melo (2005), Seyed-Hosseini; Safaei; Asgharpour (2006), Carmignani (2009), Chang; Sun (2009), Chin <i>et al.</i> (2009a), Keskin; Özkan (2009), Chang (2009), Chang; Cheng (2010), Chang; Cheng; Chang (2010), Chang; Cheng (2011), Liu <i>et al.</i> (2011), Silvestri; De Felice; Petrillo (2012), Kutlu; Ekmekçioğlu (2012), Liu <i>et al.</i> (2012), Netto; Honorato; Qassim (2013), Liu; Liu; Liu (2013), Liu <i>et al.</i> (2014), Song <i>et al.</i> (2014), Liu <i>et al.</i> (2015), Meraj; Farhad (2015), Bozdag <i>et al.</i> (2015)                                                                                                                                                                                          | 23    |
| Imprecisão na avaliação das pontuações (SOD)                   | Braglia (2000), Xu <i>et al.</i> (2002), Braglia; Frosolini; Montanari (2003a), Braglia; Frosolini; Montanari (2003b), Garcia; Schirru; Melo (2005), Sharma; Kumar; Kumar (2005), Teng <i>et al.</i> (2006), Dong (2007), Yang; Bonsall; Wang (2008), Segismundo; Miguel (2008), Carmignani (2009), Chin <i>et al.</i> (2009a), Chin <i>et al.</i> (2009b), Wang <i>et al.</i> (2009), Chen; Ko (2009a), Chen; Ko (2009b), Abdelgawad; Fayek (2010), Chang; Cheng; Chang (2010), Gargama; Chaturvedi (2011), Liu <i>et al.</i> (2011), Yang <i>et al.</i> (2011), Zammori; Gabbrielli (2012), Kutlu; Ekmekçioğlu (2012), Liu <i>et al.</i> (2012), Liu; Liu; Liu (2013), Liu <i>et al.</i> (2014), Song <i>et al.</i> (2014), Du <i>et al.</i> (2014), Lolli <i>et al.</i> (2015), Bozdag <i>et al.</i> (2015). | 30    |
| A fórmula para NPR é questionável.                             | Gilchrist (1993), Ben-Daya; Raouf (1996), Chang; Wei; Lee (1999), Kmenta; Ishii (2000), Chang; Liu; Wei (2001), Puente <i>et al.</i> (2002), Braglia; Frosolini; Montanari (2003a), Braglia; Frosolini; Montanari (2003b), Rhee; Ishii (2003), Tay; Lim (2006b), Yang; Bonsall; Wang (2008), Chin <i>et al.</i> (2009a), Chin <i>et al.</i> (2009b), Chang (2009), Chang; Cheng (2010), Gargama; Chaturvedi (2011), Liu <i>et al.</i> (2011), Geum; Cho; Park (2011), Kutlu; Ekmekçioğlu (2012), Liu <i>et al.</i> (2012), Sant'anna (2012), Liu; Liu; Liu (2013), Liu <i>et al.</i> (2014), Du <i>et al.</i> (2014), Liu <i>et al.</i> (2015), Meraj; Farhad (2015), Bozdag <i>et al.</i> (2015).                                                                                                              | 26    |
| Diferente conversão de pontuações para S, O, D                 | Gilchrist (1993), Ben-Daya; Raouf (1996), Chang; Wei; Lee (1999), Chang; Liu; Wei (2001), Sankar; Prabhu (2001), Puente <i>et al.</i> (2002), Braglia; Frosolini; Montanari (2003a), Braglia; Frosolini; Montanari (2003b), Chen (2007), Dong (2007), Ahsen (2008), Segismundo; Miguel (2008), Carmignani (2009), Chang; Sun (2009), Chin <i>et al.</i> (2009b), Liu <i>et al.</i> (2011), Liu; Liu; Liu (2013), Liu <i>et al.</i> (2014), Paciarotti <i>et al.</i> (2014).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 19    |

Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2013)

Existem ainda estudos que tratam da interdependência entre vários modos de falha (CHIN *et al.*, 2009b; XU *et al.*, 2002; ZAMMORI; GABBRIELLI, 2012a); dificuldades na pontuação de ocorrência para novos projetos (AHSEN, 2008; GARCIA; SCHIRRU; MELO, 2005) ou ainda imprecisão na descrição das causas potenciais (TENG *et al.*, 2006), entretanto a análise da subjetividade nas definições que envolvem dúvidas não só na atribuição dos valores, mas também na definição dos elementos que devem ser avaliados para que os valores sejam atribuídos, tem sido pouco explorada, e conforme relatado por Sant'anna (2012) as mudanças propostas em FMEA para ter em conta a incerteza em cada medição não obtiveram grande aceitação.

Adicionalmente, a avaliação dos modos de falha é um processo de tomada de decisão subjetiva e incerta (SONG *et al.*, 2014), cujo problema fundamental é tentar quantificar o risco sem quantificar adequadamente os fatores que contribuem para sua formação (SANKAR; PRABHU, 2001). Isso ocorre porque os tomadores de decisão na equipe de FMEA tendem a julgar a importância de fatores de risco e avaliar diferentes modos de falha, à luz de sua própria percepção (SONG *et al.*, 2014). Outro fato a ser considerado é que, durante a fase de desenvolvimento, as informações de entrada para FMEA ainda não são muito claras (DONG, 2007). Ambas as situações resultam em descrições vagas e gerais, que muitas vezes criam confusão entre os participantes envolvidos (TENG *et al.*, 2006). Esta falta de consenso, aliada à imprecisão nas informações, faz com que seja difícil se realizar o FMEA (NETTO; HONORATO; QASSIM, 2013). Tais dificuldades podem refletir em irregularidades na execução de um FMEA de acordo com o tipo de análise, seja na fase de Modelo Estrutural, Pontuação ou mesmo Decisão e Ação (ver Quadro 1). Em um estudo que envolveu a análise de FMEA de Processo de diversas empresas, Aguiar e Salomon (2007) identificaram 21 tipos de irregularidades, distribuídas nas Etapas de um a quatro. O Quadro 4 apresenta a distribuição destas irregularidades distribuídas nas etapas de acordo com o tipo de análise do FMEA.

Quadro 4 - Irregularidades do FMEA por Etapa de execução de acordo com o tipo de análise

| Irregularidades em aplicação de FMEA por Etapa de Execução |                                                                           | Fase do FMEA      |           |                |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------|----------------|
|                                                            |                                                                           | Modelo Estrutural | Pontuação | Decisão e Ação |
| ETAPA 1                                                    | Descrição genérica e não técnica do modo de falha                         | X                 |           |                |
|                                                            | Modo de falha não relacionado com a função do processo                    | X                 |           |                |
|                                                            | Efeito não ligado ao modo de falha                                        | X                 |           |                |
|                                                            | O efeito não considera a percepção do cliente                             | X                 |           |                |
|                                                            | Descrição genérica e não técnica do efeito                                | X                 |           |                |
|                                                            | Inconsistência nos valores de Severidade e identificação da classificação |                   | X         |                |
|                                                            | Valor da Severidade variando para um mesmo efeito                         |                   | X         |                |
| ETAPA 2                                                    | Definição genérica da causa, distante da causa raiz                       | X                 |           |                |
|                                                            | O controle de prevenção não atua na causa                                 | X                 |           |                |
|                                                            | Não apresenta controle de prevenção                                       | X                 |           |                |
|                                                            | Causa não ligada ao modo de falha                                         | X                 |           |                |
|                                                            | Pontuação de Ocorrência não relacionada com a causa                       |                   | X         |                |
|                                                            | Variação da pontuação de Ocorrência para uma mesma causa                  |                   | X         |                |
| ETAPA 3                                                    | Controle com descrição genérica ou referenciando documento interno        | X                 |           |                |
|                                                            | O controle de detecção não está relacionado com o modo de falha           | X                 |           |                |
|                                                            | Variação da pontuação de Detecção para mesmo controle                     |                   | X         |                |
| ETAPA 4                                                    | Busca do índice de NPR inferior à nota de corte / erros de multiplicação  |                   | X         |                |
|                                                            | Baixo nível de tomada de ação                                             |                   |           | X              |
|                                                            | Indefinição de responsável e prazo                                        |                   |           | X              |
|                                                            | Ações sem foco preventivo / valor agregado                                |                   |           | X              |
|                                                            | Ações atrasadas                                                           |                   |           | X              |

Fonte: Adaptado de Aguiar e Salomon (2007)

A sequência deste trabalho apresenta estudos que envolvem alternativas para minimizar as dificuldades que dão origem às irregularidades, com base na classificação apresentada no Quadro 4.

### 3. ANÁLISE QUALITATIVA REFERENTE À CONSTRUÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL DO FMEA

Como qualquer outra ferramenta de qualidade, antes de ser usado, o FMEA deve ser compreendido e, uma vez que esse entendimento é obtido, e adicionado ao empenho da equipe envolvida, torna-se possível identificar os aspectos a serem melhorados nos processos produtivos. Muitas vezes as informações fornecidas no FMEA podem ser vagas (TENG *et al.*, 2006), onde a equipe de FMEA demonstra diferentes opiniões e conhecimentos, produzindo diferentes tipos de informação, o que acaba gerando dúvidas se as avaliações estão completas e se os dados obtidos são realmente conhecidos e suficientemente completos para que possam receber atribuições de valores (CHIN *et al.*, 2009a).

Há ainda muitos casos onde a equipe abre questionamentos se os modos de falha são realmente modos de falha, causas ou efeitos (TENG *et al.*, 2006), sendo muito comum uma equipe de FMEA confundir modo de falha com o efeito (RHEE; ISHII, 2003). Em linhas gerais, o modo de falha e o efeito descrevem uma mesma coisa, porém sendo vista por dois lados diferentes (TENG *et al.*, 2006). O modo de falha como a função da etapa do processo pode vir a falhar e o efeito é como esta falha seria percebida pelo cliente (AGUIAR; SALOMON, 2007). Nesta abordagem, é recomendado que o modo de falha seja redigido como uma expressão negativa à função do processo (PALADY, 1997), isto vem a fazer com que se garanta a ligação direta entre a função e o modo de falha, facilitando também o apontamento das causas.

Um ponto chave para o sucesso da implementação do FMEA é garantir que todos os participantes a compreendam como utilizá-lo (TENG *et al.*, 2006). Para eliminar ou minimizar o nível de dúvidas acerca das definições básicas de um FMEA, ou seja, as definições que fazem parte das análises que envolvem o modelo estrutural do FMEA, surge aqui a proposta de se desenvolver esta fase do FMEA a partir de conceitos relacionados com a abordagem por processos, definidos na ISO 9001, que é um aspecto inédito em relação a este assunto. A fim de demonstrar nitidamente a importância desta nova abordagem, uma comparação com a aplicação convencional é realizada em um estudo na atividade de inspeção

de recebimento de uma empresa automotiva (AGUIAR; SALOMON; MELLO, 2015)<sup>4</sup>, sendo que tal abordagem se mostra capaz de reduzir significativamente as dificuldades relacionadas às análises que envolvem o modelo estrutural do FMEA, impactando ainda numa melhor condição para as atribuições dos valores de Severidade, Ocorrência e Detecção.

### 3.1 FMEA E A ABORDAGEM DE PROCESSO

As normas da série ISO 9000 foram editadas pela primeira vez em 1987 pela Organização Internacional de Normalização (ISO) e rapidamente se tornaram-se referência em gestão da qualidade nas empresas (PINTO, CARVALHO e HO, 2008). Como escrito por Alic e Rusjan (2010), as normas têm sido reavaliadas aproximadamente a cada sete anos, desenvolvendo as suas necessidades e os efeitos esperados sobre o desempenho do negócio. Em novembro de 2008 a quarta edição foi emitida (após edições em 1987, 1994 e 2000). E esta revisão da norma, em comparação com a versão de 2000, sobre o qual este estudo baseia-se, representa apenas alguns ajustes, ao invés de uma revisão completa.

De acordo com Wahid, Corner e Peck-Leong (2011) a versão 2008 da ISO 9001 não contém quaisquer novas exigências, sendo em termos de estrutura e contorno, é idêntica à versão 2000. A ISO 9001:2000 contém cinco cláusulas principais, como o sistema de gestão da qualidade, responsabilidade de gestão, gestão de recursos, realização do produto e medição, análise e melhoria. Pinto, Carvalho e Ho (2008) completam o cenário com outros pontos importantes, tais como: estrutura de abordagem de processo; ênfase na melhoria contínua dos produtos e serviços; forte compromisso da administração da empresa para o sistema de gestão da qualidade; concentrar-se na medição e análise dos resultados da organização; e monitoramento da satisfação dos clientes. A disseminação mundial destas normas tem sido impulsionada com o avanço da gestão da qualidade, e seu atual estágio de evolução nas organizações passa a ser reconhecido no mercado como um certificado de garantia de qualidade (KARTHA, 2004).

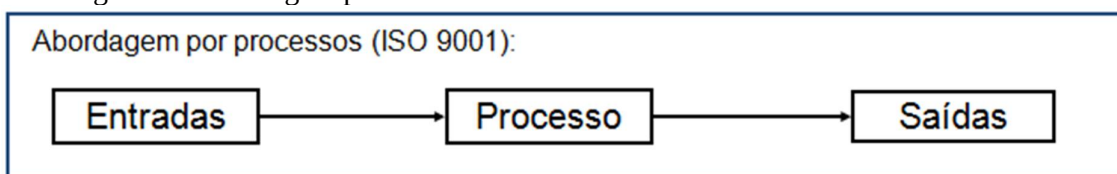
É válido salientar que, dentro deste ciclo de revisões, e durante o período de realização desta pesquisa, foi publicada a versão 2015 da ISO 9001. Tal versão se mantém baseada na abordagem por processos, por ter sido muito bem sucedida nas versões anteriores

---

<sup>4</sup> Este estudo gerou uma publicação científica no *International Journal of Quality & Reliability Management*, em 2015

(LAZARTE, 2014). Desta forma, os requisitos das últimas edições da ISO 9001 enfatizam mais fortemente a efetiva implementação de processos de negócio (ALIC; RUSJAN, 2010; LAZARTE, 2014). Um dos aspectos mais marcantes está relacionado com a abordagem de processo, cujo conceito básico fornece uma maneira específica de se estruturar e gerenciar as atividades de processos de uma forma sistemática e integrada, alinhando as expectativas dos clientes para a eficácia de toda a organização. Na concepção do processo mais frequente é qualquer atividade ou conjunto de atividades que leva uma entrada, agrega valor a ele e fornece uma saída para um cliente, como mostrado na Figura 9.

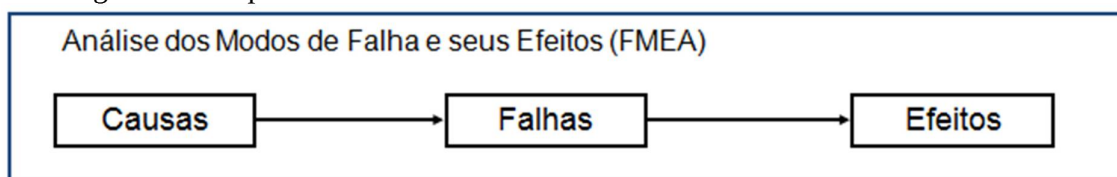
Figura 9 - Abordagem por Processos



Fonte: (ALIC e RUSJAN, 2010)

Cassanelli *et al.* (2006) e Chang, Chang e Tsai (2013) afirmam que o FMEA é conhecido por ser um procedimento para a análise de um sistema, usado para identificar possíveis modos de falha, causas e efeitos sobre o desempenho do processo. Tal análise pode ser comparada com a sequência de eventos que compõem a abordagem por processo, porém considerando o que deve ser evitado neste sistema. Assim, o FMEA de Processo pode ser representado como uma análise baseada na sequência de três eventos indesejáveis definidos como Causas, Falhas e Efeitos. Como apresentado na Figura 10, tais eventos possuem sempre a mesma sequência cronológica, ou seja, as causas dão origem às falhas, que por sua vez, geram os efeitos, e quanto menor a chance destas transformações indesejáveis acontecerem, maior a confiabilidade do processo em termos de qualidade e satisfação de clientes.

Figura 10 - Sequência de eventos do FMEA de Processo

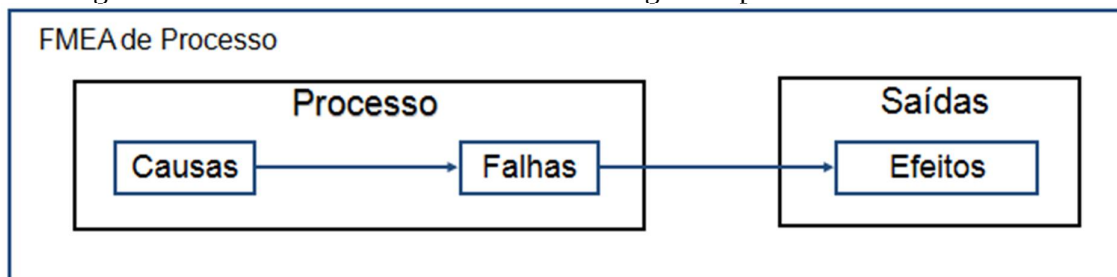


Fonte: (Elaboração própria)

Dentro da abordagem por processos definida pela ISO 9001, o FMEA de Processo pode encaixar-se como apresentado na Figura 11, onde as falhas e suas respectivas causas são tratadas dentro do processo atual em análise e os efeitos são tratados como saídas. Eventuais causas ou falhas de processos anteriores devem ser analisadas no FMEA de cada processo

anterior, considerando-se assim, o efeito de análise de impacto neste processo atual, fechando-se assim o conceito de um sistema formado por diversos processos.

Figura 11 - Eventos do FMEA dentro da abordagem de processos

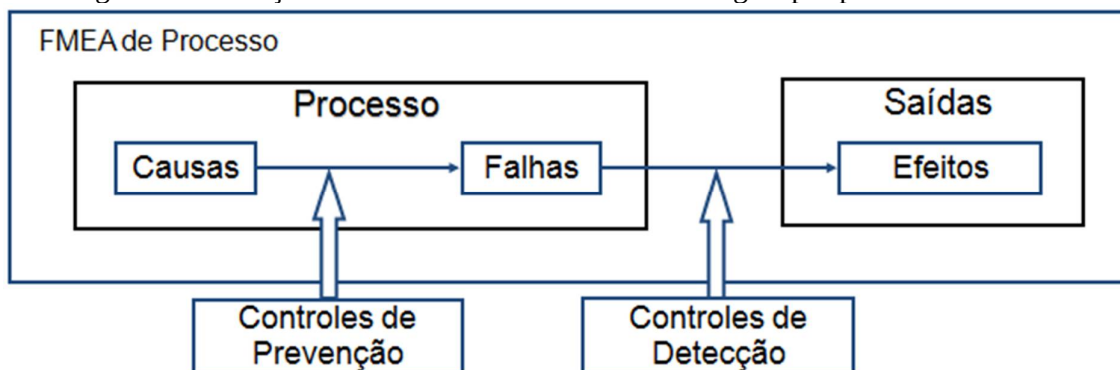


Fonte: (Elaboração própria)

Com base na alocação das causas e das falhas no processo em análise, e também com a associação dos efeitos nas saídas deste processo, estabelece-se então o foco para a atuação dos controles. A partir do conceito que as causas, as falhas e os efeitos são eventos indesejáveis no processo e que ocorrem dentro de uma sequência cronológica, os controles são definidos para que atuem de forma direta com o propósito de se evitar esta sequência de eventos indesejáveis que resultaria em altos níveis de insatisfação dos clientes. Os controles são classificados em controles de prevenção e controles de detecção (BAHRAMI; BAZZAZ; SAJJADI, 2012). Os controles de prevenção são aqueles que atuam no processo e monitoram a ocorrência das causas, cuja finalidade é evitar que estas se transformem em falhas. Estes controles estão relacionados às características de processo, tais como: Parâmetros de regulagem de máquina; Intervenções periódicas em ferramental; Monitoramento de desgaste de componentes e equipamentos, etc. Já os controles de detecção são aquelas inspeções realizadas no produto, podendo ser definida por amostragem, dentro de uma frequência planejada e estabelecida. Os controles de detecção têm como finalidade avaliar como os produtos estão saindo do processo e, de certa forma, simulam a o atendimento às funções agregadas ao produto no processo em análise. A Figura 12 apresenta a alocação dos controles do FMEA dentro da proposta de abordagem por processos.



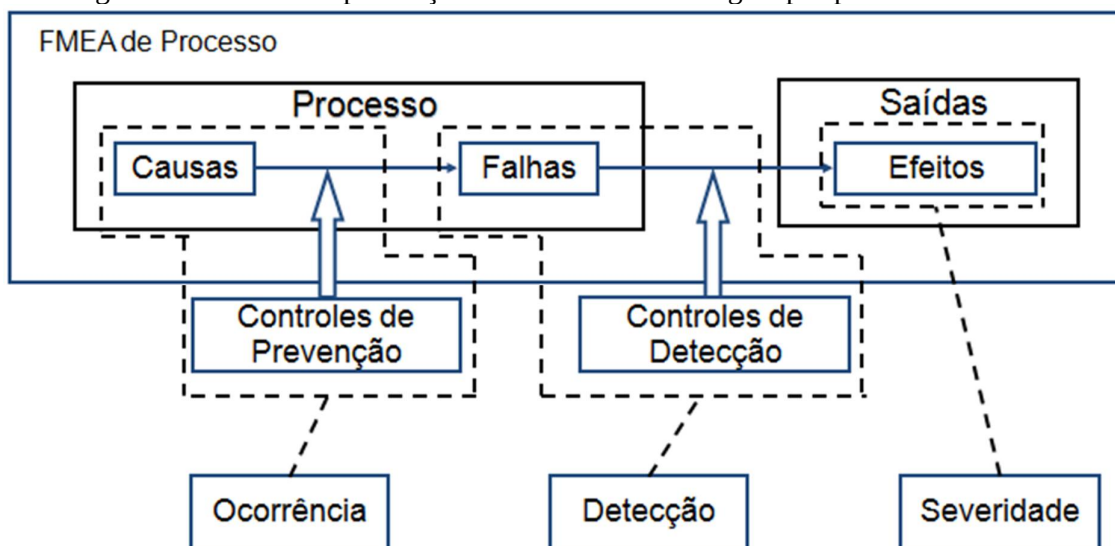
Figura 12 - Atuação dos controles do FMEA na abordagem por processos



Fonte: (Elaboração própria)

Tais fatores são obtidos pela atribuição de valores a partir de uma escala de um a dez, sendo que a Severidade está relacionada com a gravidade do efeito da falha; a Ocorrência está relacionada com chance da causa se transformar em uma falha; a Detecção está relacionada com a chance de se detectar uma falha antes que esta se transforme em um efeito. A Figura 13 apresenta este mapeamento das pontuações dentro da proposta de abordagem por processos.

Figura 13 - Fatores de pontuação em FMEA na abordagem por processos



Fonte: (Elaboração própria)

O Número de Prioridade de Risco é obtido pela multiplicação dos valores de Severidade, Ocorrência e Detecção. Para os maiores valores de NPR, ou ainda para os casos onde nota-se situações mais críticas de risco, ações são recomendadas para a melhoria dos controles atuais de processo, sendo que melhorias proposta para o controle de prevenção irão resultar na diminuição da pontuação de Ocorrência, ao passo que as melhorias propostas para os controles de Detecção irão resultar na diminuição da pontuação de Detecção. Como a

pontuação de Severidade está relacionada com os efeitos fora do processo, só pode ser alterada mediante modificações de projeto que reflitam na função do produto relacionada ao modo de falha em questão. É importante salientar que, na construção do modelo estrutural do FMEA, é muito comum determinada falha ter origem em mais de uma causa, potencialmente. Assim, para cada modo de falha potencial, são identificadas várias causas potenciais, e, conseqüentemente, para cada causa potencial, têm-se a definição de um controle de prevenção. Esta possibilidade existe também na definição dos efeitos potenciais da falha, porém existe um consenso para que seja definido apenas o de maior impacto, seja na sequência do processo ou na utilização do produto.

### 3.2 APLICAÇÃO DO ESTUDO

Em uma pesquisa realizada em empresas automotivas, Aguiar e Salomon (2007) identificaram alguns aspectos específicos da implementação do Processo FMEA que, de acordo com as referências citadas, foram classificados como irregularidades que prejudicam a Gestão da Qualidade em diversas etapas processo de fabricação de peças automotivas. Entre essas etapas, está a atividade de inspeção de recebimento, onde as características dos produtos adquiridos são verificadas, a fim de avaliar a sua conformidade com os requisitos da especificação descritos nos pedidos de compra. Como este não é um ambiente onde ocorrem alterações no produto, muitas empresas não dedicam atenção suficiente a esta atividade, mas qualquer falha pode causar efeitos muito graves, incluindo a produção de peças com o material diferente do especificado. Por esta razão definiu-se o processo de inspeção de recebimento para o desenvolvimento desta pesquisa.

Por questões de confidencialidade, a empresa selecionada para o desenvolvimento desta pesquisa foi chamada de "Empresa ALPHA". A razão para a seleção dessa empresa é baseada no atendimento em alguns critérios pré-determinados. O Quadro 5 apresenta os critérios utilizados e respectivos níveis de atendimento.

Quadro 5 - Critérios para seleção da Empresa ALPHA e níveis de atendimento

| <b>Critério de Seleção</b>                                                                                                                | <b>Nível de atendimento</b>                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Empresa do setor automotivo, cuja aplicação do FMEA é um requisito obrigatório                                                            | O objeto de estudo é uma empresa do setor automotivo, com a certificação ISO/TS 16949 para o sistema de gestão da qualidade.            |
| Possibilidade de aplicação do FMEA com base nos conceitos de abordagem de processo                                                        | A empresa aplicou no processo de inspeção de recebimento as duas técnicas de forma integrada.                                           |
| Ausência de um processo sistemático formal de identificação de referência como uma forma de se obter uma maior eficácia na administração. | Antes de realizar a integração e alcançar seus resultados, a empresa não tinha sistema formal para a integração de diferentes técnicas. |
| Desenvolvimento de projetos de gestão que podem ser interessantes para outras empresas.                                                   | O método desenvolvido tem um grande potencial de extensão para a cadeia de abastecimento "Empresa ALPHA".                               |

Fonte: Dados da Pesquisa

Como técnicas de coleta de dados, entrevistas não estruturadas com o coordenador do FMEA da “Empresa ALPHA” e também a observação direta dos formulários de FMEA já desenvolvidos e implementados foram realizados. Para a condução deste estudo foi utilizado como unidade de análise o FMEA de Processo da operação de inspeção de recebimento. Esta situação é apresentada na Figura 14, que retrata uma condição típica de aplicação FMEA de Processo empresa metalúrgica que pertence à cadeia automotiva *Tier 2*<sup>5</sup>.

Neste exemplo, é possível apontar algumas irregularidades na aplicação do FMEA que refletem uma condição de pouco valor acrescentado em relação à Gestão da Qualidade. Inicialmente, é possível identificar que a definição de modo de falha não leva em consideração a função do processo em análise. Além de ser definido de uma forma genérica, sem especificar o modo de falha real, tratam-se de falhas que pertencem a processos anteriores e deveriam ter sido analisadas no FMEA do processo correspondente, onde existe a possibilidade da não execução das funções correspondentes.

---

<sup>5</sup> *Tier 2*: Fornecedor do segundo nível da cadeia automotiva

Figura 14 - Típica aplicação de FMEA em operação de inspeção de recebimento

| Item / Função | Modo de Falha Potencial                            | Efeito(S) Potencia(S) de Falha           | S E V E . | C L A S . | Causa Potencial (6M) Mecanismos            | O C O R . | Controle de Prevenção Atual                         | Controle de Detecção Atual                      | D E T C . | N P R | Ações Recomendadas | Responsabilidade pelas ações recomenda-das e prazos envolvidos | Ações Resultantes |           |           |           |       |
|---------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------|-----------|--------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------|-------|--------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-------|
|               |                                                    |                                          |           |           |                                            |           |                                                     |                                                 |           |       |                    |                                                                | Ação Tomada       | S E V E . | O C O R . | D E T C . | N P R |
| Recebimento   | Material fora do especificado                      | Pode ocasionar falta de material na peça | 5         |           | Falha no fornecedor                        | 1         | Certificado de qualidade antes do envio do material | Trena                                           | 4         | 20    |                    |                                                                |                   |           |           |           |       |
|               | Material fora do especificado                      | Ocasiona falta de material               | 4         |           | Falha na especificação do pedido de compra | 1         | Certificado de qualidade antes do envio do material | Trena                                           | 4         | 16    |                    |                                                                |                   |           |           |           |       |
|               | Material fora do especificado (químico e mecânico) | Não permite continuidade do processo     | 8         |           | Falha na especificação do pedido de compra | 1         | Certificado de qualidade antes do envio do material | Certificado de qualidade                        | 4         | 32    |                    |                                                                |                   |           |           |           |       |
|               | Identificação do material errada                   | Impossibilita o processo correto da peça | 4         |           | Erro na identificação do material          | 2         | -                                                   | Visual + certificado de qualidade do fornecedor | 5         | 40    |                    |                                                                |                   |           |           |           |       |
|               | Identificação do material errada                   | Poderá danificar o material              | 4         |           | Erro na identificação do material          | 2         | -                                                   | Visual + certificado de qualidade do fornecedor | 5         | 40    |                    |                                                                |                   |           |           |           |       |

Fonte: Dados da Pesquisa

Para definir o efeito, a palavra "pode" contida na definição "pode causar falta de material na parte" é redundante, já que o efeito já é considerado como uma possibilidade por sua definição: efeitos potenciais de falha. O mesmo ocorre quando o efeito é definido pelo termo "pode danificar o material". Na definição do efeito, também é possível identificar as definições genéricas, tais como "não permite a continuação do processo" e "impede o processo correto da peça" que não especificam qual o impacto potencial real a ser gerado na sequência do processo, não sendo possível assegurar a definição de um valor constante para a escala de Severidade.

Além desta situação, é possível ver outro tipo de inconsistência na pontuação de Severidade: a atribuição de duas pontuações diferentes para o mesmo efeito, ou a Severidade com o valor 5 para o efeito "pode causar falta de material" e valor de severidade 4 para "provoca falta de material". No caso da identificação das causas potenciais das falhas, uma vez que o FMEA não tenha identificado um modo de falha relacionada com a operação de inspeção de recebimento, nenhuma das causas definidas refere-se ao processo em análise. É válido comentar que, se fosse um FMEA de Processo de fabricação de chapas, as causas definidas seriam, na verdade, modos de falha. Para um ajuste adequado dos termos "falha dos fornecedores" e "Falha na especificação do pedido de compra" como uma causa, é necessário encontrar situações em que podem ocorrer esses tipos de falha e, no primeiro caso, a falha é descrito de uma forma muito genérica, não sendo capaz de identificar quais das muitas "funções do fornecedor" poderia falhar. Como a pontuação de ocorrência é um atributo diretamente relacionado com a definição das causas, e estas não estão relacionados com o processo de inspeção de recebimento, pode-se afirmar que os valores de ocorrência neste FMEA não estão em conformidade com as falhas que deveriam estar sendo analisadas.

A definição de causas não relacionadas com o processo de análise vem a impossibilitar a correta definição dos controles de prevenção, ligando-se a fatores que não são controles, tais como "certificado de qualidade antes de enviar o material", ou simplesmente não colocar qualquer definição. Esta mesma analogia aplica-se em relação aos controles de detecção e sua relação com a correta definição do modo de falha, ou seja, a definição da falha que não considera a função do processo acarreta em problemas para a correta definição dos controles de detecção. Os termos "fita de medição" e "certificado de qualidade" são, na verdade, entradas deste processo, e não controles de detecção, cujo propósito é detectar a falha antes

que se torne um efeito, evitando possíveis impactos negativos na sequência do processo ou mesmo no cliente final.

Como a pontuação de detecção é realizada de acordo com o poder de detecção dos controles de detecção e, os controles definidos neste FMEA, não são relevantes para o processo de inspeção de recebimento, é possível se admitir que, assim como no caso da pontuação de ocorrência, os valores da pontuação de detecção não estão de acordo com as falhas que deveriam ter sido analisadas neste processo. Desta forma, a partir da definição incorreta dos valores de ocorrência e detecção e identificação da inconsistência na pontuação de Severidade, pode-se afirmar que o FMEA apresentado na Figura 14 não foi corretamente aplicado, uma vez que a maneira pela qual se dá a formação dos valores de NPR não os torna capazes de medir os riscos do processo. Esta identificação incorreta começa a partir dos oito tipos de deficiências identificadas no presente formulário FMEA.

A Tabela 28 apresenta, de forma sintetizada, essas irregularidades, de acordo com o número de vezes que cada uma delas ocorre dentro de cinco possibilidades nesta aplicação de FMEA.

Tabela 28 - Ocorrência de irregularidades no FMEA apresentado na Figura 14

| Número | Irregularidade                                                           | Ocorrência / Aplicação |
|--------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 1      | Modo de Falha não relacionado com a função do processo                   | 5 / 5                  |
| 2      | Descrição genérica do efeito                                             | 2 / 5                  |
| 3      | Incoerência na pontuação de severidade                                   | 2 / 5                  |
| 4      | Causa não relacionada com o processo em análise                          | 5 / 5                  |
| 5      | Pontuação de ocorrência não relacionada com causas de falhas no processo | 5 / 5                  |
| 6      | Controle de prevenção não atua na causa                                  | 5 / 5                  |
| 7      | Controle de detecção não relacionado ao modo de falha                    | 5 / 5                  |
| 8      | Pontuação de detecção não relacionada ao controle de detecção            | 5 / 5                  |

Fonte: Dados da Pesquisa

Adicionalmente, a Figura 15 apresenta a indicação das irregularidades enumeradas na Tabela 28 no FMEA em análise, com o intuito de facilitar a visualização da ocorrência de tais irregularidades.

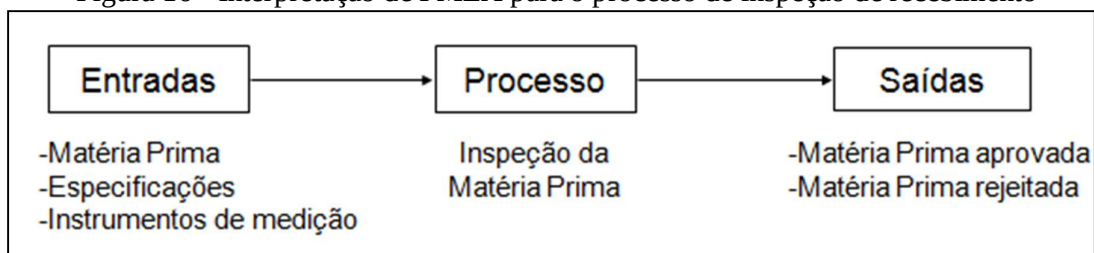
Figura 15 - Típica aplicação de FMEA em operação de inspeção de recebimento com a indicação das irregularidades

| Item / Função | Modo de Falha Potencial                                   | Efeito(S) Potencia(S) de Falha                  | S<br>E<br>V<br>E<br>. | C<br>L<br>A<br>S<br>. | Causa Potencial (6M) Mecanismos                   | O<br>C<br>O<br>R<br>. | Controle de Prevenção Atual                                    | Controle de Detecção Atual                             | D<br>E<br>T<br>C<br>. | N<br>P<br>R | Ações Recomendadas | Responsabilidade pelas ações recomenda-das e prazos envolvidos | Ações Resultantes |                       |                       |                       |             |
|---------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------|-------------|--------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
|               |                                                           |                                                 |                       |                       |                                                   |                       |                                                                |                                                        |                       |             |                    |                                                                | Ação Tomada       | S<br>E<br>V<br>E<br>. | O<br>C<br>O<br>R<br>. | D<br>E<br>T<br>C<br>. | N<br>P<br>R |
| Recebimento   | Material fora do especificado<br>(1)                      | Pode ocasionar falta de material na peça<br>(2) | 5                     |                       | Falha no fornecedor<br>(4)                        | 1                     | Certificado de qualidade antes do envio do material<br>(5) (6) | Trena<br>(7)                                           | 4<br>(8)              | 20          |                    |                                                                |                   |                       |                       |                       |             |
|               | Material fora do especificado<br>(1)                      | Ocasiona falta de material                      | 4                     |                       | Falha na especificação do pedido de compra<br>(4) | 1                     | Certificado de qualidade antes do envio do material<br>(5) (6) | Trena<br>(7)                                           | 4<br>(8)              | 16          |                    |                                                                |                   |                       |                       |                       |             |
|               | Material fora do especificado (químico e mecânico)<br>(1) | Não permite continuidade do processo            | 8                     |                       | Falha na especificação do pedido de compra<br>(4) | 1                     | Certificado de qualidade antes do envio do material<br>(5) (6) | Certificado de qualidade<br>(7)                        | 4<br>(8)              | 32          |                    |                                                                |                   |                       |                       |                       |             |
|               | Identificação do material errada<br>(1)                   | Impossibilita o processo correto da peça<br>(3) | 4                     |                       | Erro na identificação do material<br>(4)          | 2                     | -<br>(5) (6)                                                   | Visual + certificado de qualidade do fornecedor<br>(7) | 5<br>(8)              | 40          |                    |                                                                |                   |                       |                       |                       |             |
|               | Identificação do material errada<br>(1)                   | Poderá danificar o material<br>(2)              | 4                     |                       | Erro na identificação do material<br>(4)          | 2                     | -<br>(5) (6)                                                   | Visual + certificado de qualidade do fornecedor<br>(7) | 5<br>(8)              | 40          |                    |                                                                |                   |                       |                       |                       |             |

Fonte: Dados da Pesquisa

É importante salientar que em FMEA, falha e defeito possuem definições distintas. De acordo com Palady (1997), a falha ocorre quando um componente ou sistema não executa a sua função, e o defeito ocorre quando um componente ou sistema não atende determinada especificação técnica mensurável. Assim, se o material estiver fora da especificação deve ser visto como um efeito da falha, cuja função seria algo relacionado com a produção de material, mas não da inspeção. Para o procedimento de inspeção de recebimento, o material é de uma das entradas, e o fato de este estar de acordo com a especificação, ou não, é considerado como um resultado do processo anterior, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Interpretação de FMEA para o processo de inspeção de recebimento



Fonte: Dados da Pesquisa

A fim de evitar a definição do modo de falha referindo-se a um processo anterior, Palady (1997) recomenda que este deva ser escrito como uma expressão negativa à função do processo. Como a função do processo de inspeção está relacionada à garantia da conformidade do produto, as falhas desse processo podem ser resumidas em "rejeição de material em conformidade" ou "aprovação de material não conforme", no entanto, para uma maior consistência nas pontuações, é necessário especificar as características do material de acordo com as causas e os efeitos potenciais.

Combinando os conceitos da Abordagem de Processos com os conceitos de FMEA de Processo discutidos na Seção 2.2 do presente trabalho, é possível propor uma aplicação mais coerente do FMEA no processo de inspeção de recebimento. A Figura 17 apresenta esta nova concepção do FMEA, já sem a presença das irregularidades: modo de Falha não relacionado com a função do processo; descrição genérica do efeito; causa não relacionada com o processo em análise e controle de prevenção não atua na causa, porém ainda sem as atribuições dos valores para Severidade, Ocorrência e Detecção, cujo estudo será apresentado na Seção 4 deste trabalho.



Figura 17 - Formulário FMEA de Processo atualizado, porém sem pontuação

| Item / Função                            | Modo de Falha Potencial             | Efeito(S) Potencia(S) de Falha        | S E V E . | C L A S . | Causa Potencial ( 6M ) Mecanismos          | O C O R . | Controle de Prevenção Atual                       | Controle de Detecção Atual                     | D E T C . | N P R | Ações Recomendadas | Responsabilidade pelas ações recomendadas e prazos envolvidos | Ações Resultantes |           |           |           |       |
|------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------|-----------|--------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------|-------|--------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-------|
|                                          |                                     |                                       |           |           |                                            |           |                                                   |                                                |           |       |                    |                                                               | Ação Tomada       | S E V E . | O C O R . | D E T C . | N P R |
| Inspeção de recebimento da matéria-prima | Aprovar chapa com comprimento menor | Falta de material na última peça      |           |           | Material recebido fora do expediente       |           | -                                                 | Auditoria periódica da inspeção de recebimento |           |       |                    |                                                               |                   |           |           |           |       |
|                                          |                                     |                                       |           |           | Utilização de instrumento inadequado       |           | Disponibilizar apenas trena e paquímetro no local | Auditoria periódica da inspeção de recebimento |           |       |                    |                                                               |                   |           |           |           |       |
|                                          | Aprovar chapa com espessura menor   | Produção de peças com espessura menor |           |           | Material recebido fora do expediente       |           | -                                                 | Auditoria periódica da inspeção de recebimento |           |       |                    |                                                               |                   |           |           |           |       |
|                                          |                                     |                                       |           |           | Utilização de instrumento inadequado       |           | Disponibilizar apenas trena e paquímetro no local | Auditoria periódica da inspeção de recebimento |           |       |                    |                                                               |                   |           |           |           |       |
|                                          | Aprovar chapa empenada              | Impossibilidade de corte laser        |           |           | Material recebido fora do expediente       |           | -                                                 | Auditoria periódica da inspeção de recebimento |           |       |                    |                                                               |                   |           |           |           |       |
|                                          | Aprovar material oxidado            | Geração de rebarbas no corte laser    |           |           | Recebimento em local de pouca visibilidade |           | Iluminação adequada para inspeção visual          | Auditoria periódica da inspeção de recebimento |           |       |                    |                                                               |                   |           |           |           |       |
|                                          |                                     |                                       |           |           |                                            |           |                                                   |                                                |           |       |                    |                                                               |                   |           |           |           |       |
|                                          |                                     |                                       |           |           |                                            |           |                                                   |                                                |           |       |                    |                                                               |                   |           |           |           |       |

Fonte: Dados da Pesquisa

Esta proposta apresentada na Figura 17 é específica para o processo de inspeção de recebimento de chapas para operação de corte a laser, tornando assim mais fácil de conduzir os potenciais efeitos, em conformidade com as operações seguintes no processo de produção. Ao contrário do FMEA mostrado na Figura 14, na presente proposta, a identificação do material não é considerada como uma função do processo em análise, uma vez que as questões de rastreabilidade e identificação são garantidas pela etiqueta do fornecedor das chapas de aço.

Com a conclusão desta Seção do trabalho, tem-se atingido o primeiro objetivo específico desta tese, que é desenvolver um estudo com a aplicação de FMEA de Processo com base nos conceitos de abordagem por processos visando diminuir dúvidas nas definições de causa, falha e efeito.

#### 4. ANÁLISE QUANTITATIVA REFERENTE À PONTUAÇÃO E PRIORIZAÇÃO EM FMEA

Em aplicações práticas, o FMEA tradicional, usando o NPR ainda impõe algumas limitações na solução de problemas e, por conseguinte, uma série de métodos melhorados têm sido sugeridos na literatura para melhorar o desempenho de FMEA (LIU *et al.*, 2015). LIU *et al.* (2013) realizaram um detalhado levantamento bibliográfico em publicações sobre a aplicação de FMEA nas últimas décadas. Neste levantamento, classificam a utilização de FMEA associado a outros métodos em cinco categorias, que são: MCDM (*Multi-Criteria Decision Making*); MP (*Mathematical Programming*); AI (*Artificial Intelligence*); Abordagens Integradas; e Outras Abordagens. Na Categoria MCDM, classificam-se as aplicações de AHP, ANP, DEMATEL, Teoria da Evidência, Teoria Grey e Método VIKOR. Em termos de Programação Matemática, são classificadas publicações com FMEA associado à DEA (*Data Envelopment Analysis*) e Programação Linear. No campo da Inteligência Artificial, concentram-se todas as publicações com sistemas à base de regras *Fuzzy*. São classificadas como outras abordagens, publicações que apresentam soluções para FMEA com aplicação de técnicas tais como: Modelo Baseado em Custos, Modelo Kano, QFD (*Quality Functional Deployment*), MCS (*Minimum Cut Sets Theory*), Teoria da Probabilidade e o Modelo de representação linguística 2-TUPLE. Na literatura também se encontram propostas com mais de uma destas técnicas combinadas com FMEA, sendo classificadas na categoria Abordagens Integradas. Tal classificação foi realizada com as referências bibliográficas deste trabalho, que consta uma relação de 72 publicações científicas de 1993 a 2015, que abordam a integração de FMEA com outras técnicas, divididas entre estas cinco categorias, conforme apresentado no APÊNDICE B.

Apesar destas numerosas abordagens alternativas propostas para superar a desvantagem do FMEA tradicional, existem algumas restrições a respeito destas integrações (LIU; LIU; LIU, 2013). Para cada aplicação de MCDM ou outra técnica associada ao FMEA, como suporte para as atribuições de valores de Severidade, Ocorrência e Detecção, há necessidade de interação específica com o método, onde dois fatores se tornam restrições consideráveis para a equipe de FMEA. O primeiro deles é o tempo necessário para a aplicação do método de auxílio à decisão, onde numa reunião de FMEA, acaba se tornando incompatível com a disponibilidade das pessoas para tal evento. Por exemplo, os métodos de lógica *Fuzzy* precisam de muita informação avançada, difícil de ser obter na implementação FMEA (SONG

*et al.*, 2014), e devido ao desenvolvimento e necessidade de teste de um conjunto muito extenso de regras, torna-se uma atividade tediosa e consumidora de tempo (WANG *et al.*, 2009). O outro deles é a necessidade de um especialista no método entre os membros da equipe multifuncional. Em particular, esses métodos são bastante complexos para se gerenciar e exigem a definição de funções especiais, o que dentro de empresas do segmento automotivo não é comum (SHAHIN, 2004). Com base nestas restrições, decidiu-se considerar apenas as tabelas de referência na proposta da identificação de uma melhor condição para a atribuição de valores em FMEA.

#### 4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DAS TABELAS DE REFERÊNCIA PELA APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP

Este segundo ciclo da pesquisa-ação apresenta a comparação das diversas publicações sobre as técnicas para aplicação de FMEA, mais especificamente nas tabelas de referências para as pontuações (AGUIAR; SOUZA; SALOMON, 2010)<sup>6</sup> identificadas na fundamentação teórica sobre o tema apresentada na Seção 2.2 deste trabalho. Ao todo foram levantadas na literatura 17 diferentes publicações entre os anos de 1996 e 2014, com distintas tabelas para pontuação em FMEA. Em tais publicações foram identificadas 46 diferentes tabelas de referência, que por semelhança na distribuição dos valores, ou mesmo na forma de conceituação, puderam ser agrupadas em nove tabelas para a pontuação de Severidade, bem como para as pontuações de Ocorrência e Detecção. Assim, em alguns casos, uma mesma tabela de referência chegou a ser identificada em mais de uma aplicação.

Para avaliação das tabelas de referência e posterior identificação das opções mais adequadas para as respectivas pontuações, alinhado com os objetivos desta pesquisa, é aplicado o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*). A razão da aplicação deste método é a possibilidade da escolha da melhor alternativa de decisão considerando múltiplos critérios expressos por meio de valores qualitativos ou quantitativos (SAATY, 2001) por meio de uma abordagem comparativa paritária (VAIDYA; KUMAR, 2006), sendo recomendável quando envolve a opinião do ser humano (CHENG; LI; HO, 2002). O AHP ajuda a incorporar um consenso do grupo (VAIDYA; KUMAR, 2006) e geralmente consiste de um questionário

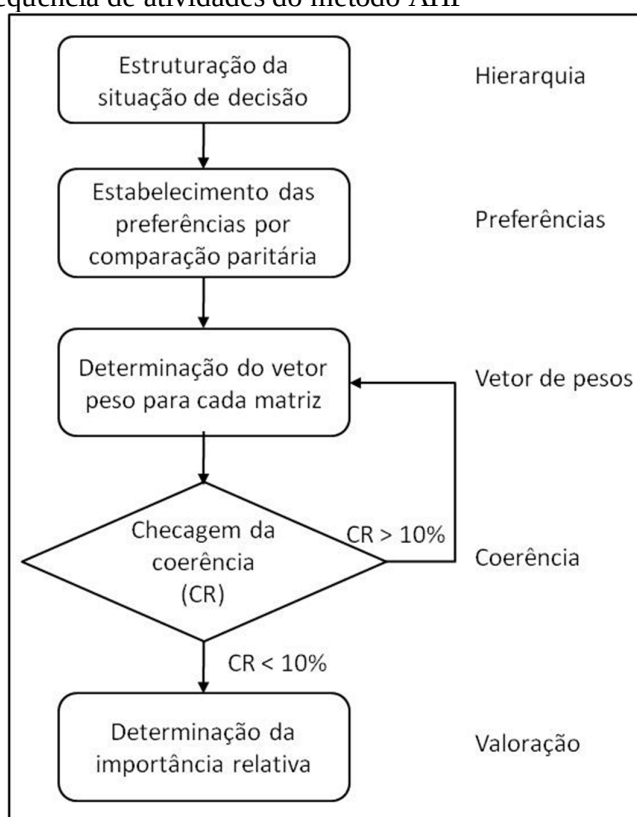
---

<sup>6</sup> Este estudo gerou uma publicação científica no *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, em 2010

para comparação de cada elemento e resultante média geométrica como resposta para se chegar a uma solução final (HO; DEY; HIGSON, 2006)

A estruturação de um problema AHP começa na definição de um objetivo global desejado (SAATY, 2001). Na sequência são estabelecidas as preferências por meio das comparações dos elementos e em seguida é determinado o vetor peso para cada matriz (HO; DEY; HIGSON, 2006). Uma revisão nos julgamentos da matriz de decisão deve ser realizada caso seja identificada incoerência nos valores obtidos (CHENG; LI; HO, 2002). A Figura 18 apresenta um fluxograma resumido da aplicação do método AHP

Figura 18 - Sequência de atividades do método AHP



Fonte: (CHENG; LI; HO, 2002; HO; DEY; HIGSON, 2006; VAIDYA; KUMAR, 2006)

Com a estruturação das situações de decisão, é possível montar o processo de comparação. A partir deste ponto, o decisor elabora as matrizes de relacionamentos, por meio de julgamentos, com objetivo de estabelecer o grau de importância de um fator em relação a outro, e desta forma definir as prioridades (SHIMIZU, 2006). Tal comparação é realizada a partir da Escala Fundamental de Saaty, critério apresentado na Tabela 29, que define e explica o conceito dos pesos utilizados no AHP.

Tabela 29 - Escala de valores para a comparação paritária no método AHP

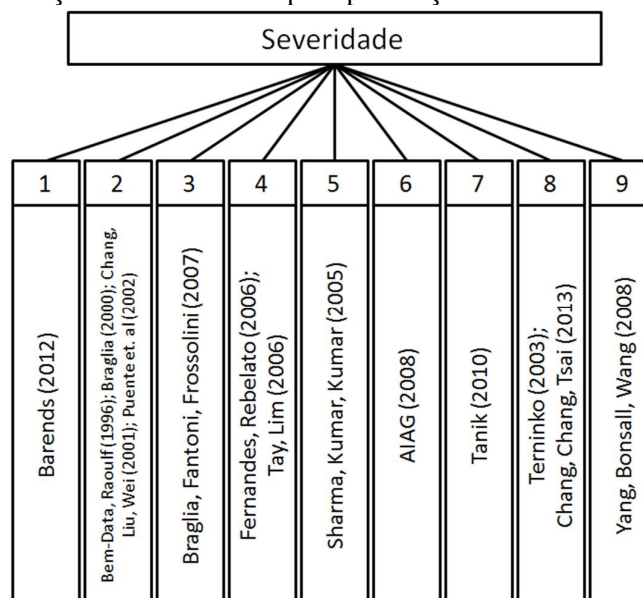
| Valor   | Definição                                                | Explicação                                                                           |
|---------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | Igual importância entre os elementos <i>i</i> e <i>j</i> | Dois elementos contribuem igualmente para o objetivo ou critério                     |
| 3       | Fraca importância de um elemento sobre o outro           | A experiência ou o julgamento é levemente a favor de um elemento sobre o outro       |
| 5       | Forte importância                                        | O julgamento é fortemente a favor de um elemento                                     |
| 7       | Importância muito forte ou importância demonstrada       | Um elemento é fortemente favorecido e sua dominância pode ser demonstrada na prática |
| 9       | Importância absoluta                                     | A evidência a favor de um elemento sobre o outro é da maior ordem de afirmação       |
| 2,4,6,8 | Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes | Quando se necessita de comprometimento ou coerência entre os julgamentos             |

Fonte: (SAATY, 2001)

Em termos gerais, duas situações foram identificadas como fragilidades nas propostas identificadas na literatura. A primeira delas consiste em situações com mais de um valor por critério que podem resultar em erros interpretativos na definição dos valores que resultarão na prioridade do risco. A segunda situação está nas propostas de pontuações com quantidade de valores inferior a dez, incluindo a falta de valores intermediários, que facilita a atribuição dos valores, porém restringe a quantidade de possíveis combinações, as quais podem resultar em um agrupamento de riscos de diferente magnitude.

Para a estrutura do processo de comparação das tabelas de referência para pontuação de Severidade, são consideradas as tabelas de referência identificadas Seção 2.2.1 do levantamento bibliográfico deste trabalho. Esta distribuição é formada por nove tabelas de Severidade, obtidas em 14 diferentes publicações entre os anos de 1996 e 2013, conforme apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Distribuição das referências para pontuação de Severidade



Fonte: Dados da Pesquisa

Para o caso específico da pontuação de severidade, os critérios óbvios, tais como insatisfação do cliente, foram considerados impróprios por configurarem na essência um efeito potencial da falha. Também foram situações referentes ao plano de reação no processo do clientes, tais como rejeição dos produtos produzidos, reparo do efeito, atraso no processo ou ainda o fato da falha provocar erros no processo do cliente. Outros aspectos significativos são os considerados de segurança e o não atendimento aos requisitos regulamentares, assim como diferenciação para perda da função primária e secundária, com aviso prévio e sem aviso prévio, e também efeito na montagem e efeito no usuário.

Os julgamentos que comparam as tabelas de Severidade foram realizados por uma equipe formada por três Engenheiros da Qualidade com experiência na aplicação e avaliação de FMEA<sup>7</sup>, com o intuito de se identificar a tabela que proporcione a atribuição de valores mais adequada. Estas comparações paritárias foram realizadas com a aplicação da Escala Fundamental de Saaty. A Tabela 30 apresenta a matriz de comparação paritária do AHP referente às tabelas de referência para a atribuição de valores para a Severidade. No que se diz respeito à análise comparativa, percebe-se que características específicas de determinadas tabelas implicam em dificuldades na atribuição de valores, como por exemplo, o fato de se ter

<sup>7</sup> Na seleção dos engenheiros para os julgamentos, foi considerada a experiência com FMEA e também o fato de serem qualificados como auditores líderes de sistema de gestão da qualidade ISO/TS 16949.

mais de um valor atribuído à determinada condição descrita na tabela e também a própria forma genérica em que algumas condições são descritas. Assim, por exemplo, a tabela de referência adotada por Braglia, Fantoni e Frossolini (2007), codificada por S3, é tida como de forte importância quando comparada com a tabela de referência proposta pelos autores Fernandes e Rebelato (2006); Tay e Lim (2006), codificada por S4. Esta classificação de forte importância se dá pelo fato da tabela codificada por S3 possuir uma descrição para cada valor a ser atribuído, ao passo que a tabela codificada por S4 apresenta descrições apenas para os valores 1, 4, 6, 8 e 10.

Tabela 30 - Julgamentos dos critérios de pontuação da severidade

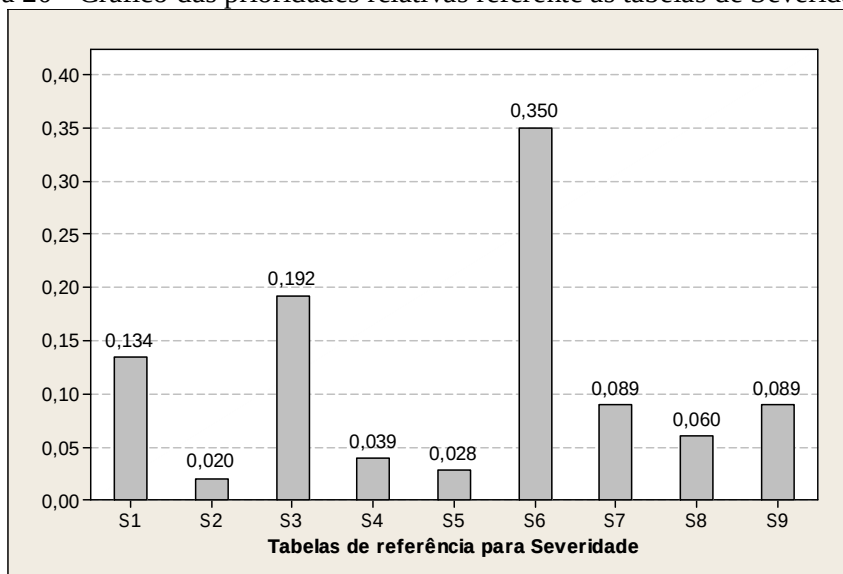
| Tabelas   | Severidade |    |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------|------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|           | S1         | S2 | S3  | S4  | S5  | S6  | S7  | S8  | S9  |
| <b>S1</b> | 1          | 6  | 1/2 | 4   | 5   | 1/4 | 2   | 3   | 2   |
| <b>S2</b> | 1/6        | 1  | 1/7 | 1/3 | 1/2 | 1/9 | 1/5 | 1/4 | 1/5 |
| <b>S3</b> | 2          | 7  | 1   | 5   | 6   | 1/3 | 3   | 4   | 3   |
| <b>S4</b> | 1/4        | 3  | 1/5 | 1   | 2   | 1/7 | 1/3 | 1/2 | 1/3 |
| <b>S5</b> | 1/5        | 2  | 1/6 | 1/2 | 1   | 1/8 | 1/4 | 1/3 | 1/4 |
| <b>S6</b> | 4          | 9  | 3   | 7   | 8   | 1   | 5   | 6   | 5   |
| <b>S7</b> | 1/2        | 5  | 1/3 | 3   | 4   | 1/5 | 1   | 2   | 1   |
| <b>S8</b> | 1/3        | 4  | 1/4 | 2   | 3   | 1/6 | 1/2 | 1   | 1/2 |
| <b>S9</b> | 1/2        | 5  | 1/3 | 3   | 4   | 1/5 | 1   | 2   | 1   |

Fonte: Dados da Pesquisa

Com o estabelecimento do grau de importância de um fator em relação a outro, é preciso definir as prioridades. Saaty (2001) propõe a obtenção da prioridade relativa das comparações a partir da normalização da média geométrica das linhas da matriz de comparações. A Figura 20 traz uma apresentação gráfica das prioridades relativas referentes a este julgamento, onde a tabela de referência apresentada por AIAG (2008), codificada por S6, apresenta o valor de aproximadamente 35%, o que indica que trata-se de uma tabela de referência mais apropriada para a pontuação de Severidade do que, por exemplo, a proposta pelos autores Ben-Daya e Raouf, (1996); Braglia, (2000); Chang, Liu e Wei (2001) e Puente *et al.* (2002), codificada por S2 e com valor de 2,0%.



Figura 20 - Gráfico das prioridades relativas referente às tabelas de Severidade



Fonte: Dados da pesquisa

Após a conclusão das comparações e obtenção dos valores de prioridade relativa, é preciso avaliar a coerência do resultado nas alternativas com respeito a cada um dos critérios que os compõe, e para tanto, é usado um indicador da consistência das comparações, *CR* (*Consistency Ratio*) (SHIMIZU, 2006), entretanto o termo correto a ser empregado é Coerência (SALOMON, 2004). A tradução para a palavra inglesa *Consistency* é coerência, uma vez que no idioma português “coerência” é a “ligação ou nexos entre os fatos” e “consistência” é o “estado de uma coisa que promete durar ou não ter mudança”. Desta forma, esta etapa trata da análise de sensibilidade, e é executada para avaliar a coerência do resultado nas alternativas, com respeito a cada um dos critérios que os compõe, que considera o afastamento entre  $\lambda$  e  $n$ , conforme a Equação 2, e considera também um erro aleatório associado à ordem da matriz de julgamento.

$$CR = \frac{\lambda - n}{(n - 1)RI} \quad (2)$$

Salomon (2004) afirma que quando uma matriz de julgamentos apresenta todos seus julgamentos coerentes entre si, tem-se  $\lambda = n$ , onde  $n$  é a ordem da matriz de julgamentos. *RI* é o índice de coerência aleatória referente a um grande número de comparações paritárias, Shimizu (2001) adota os valores para este índice conforme apresentado na Tabela 31.

Tabela 31 - Índice de coerência

| <i>n</i>  | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>RI</i> | 0,58 | 0,90 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 |

Fonte: Shimizu (2001)

Para o teste de coerência, o primeiro passo é a determinação dos pesos, sendo que para os julgamentos relacionados às tabelas de Severidade, considera-se a multiplicação da matriz de comparação paritária da Tabela 30 com a prioridade relativa encontrada para as comparações referentes à Severidade, na Figura 20, resultando na seguinte operação:

$$\begin{bmatrix} 1 & 6 & 1/2 & 4 & 5 & 1/4 & 2 & 3 & 2 \\ 1/6 & 1 & 1/7 & 1/3 & 1/2 & 1/9 & 1/5 & 1/4 & 1/5 \\ 2 & 7 & 1 & 5 & 6 & 1/3 & 3 & 4 & 3 \\ 1/4 & 3 & 1/5 & 1 & 2 & 1/7 & 1/8 & 1/2 & 1/3 \\ 1/5 & 2 & 1/6 & 1/2 & 1 & 1/8 & 1/4 & 1/3 & 1/4 \\ 4 & 9 & 3 & 7 & 8 & 1 & 5 & 6 & 5 \\ 1/2 & 5 & 1/3 & 3 & 4 & 1/5 & 1 & 2 & 1 \\ 1/3 & 4 & 1/4 & 2 & 3 & 1/6 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 5 & 1/3 & 3 & 4 & 1/5 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,134 \\ 0,020 \\ 0,192 \\ 0,039 \\ 0,028 \\ 0,350 \\ 0,089 \\ 0,060 \\ 0,089 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,269 \\ 0,186 \\ 1,852 \\ 0,348 \\ 0,255 \\ 3,386 \\ 0,827 \\ 0,542 \\ 0,827 \end{bmatrix}$$

$$= [1,269 \ 0,186 \ 1,852 \ 0,348 \ 0,255 \ 3,386 \ 0,827 \ 0,542 \ 0,827]^T$$

A partir deste resultado, o vetor de coerência é obtido dividindo cada peso pela respectiva prioridade relativa, ou seja:

Vetor de Coerência =

$$\begin{bmatrix} \frac{1,269}{0,133} & \frac{0,186}{0,020} & \frac{1,852}{0,192} & \frac{0,348}{0,040} & \frac{0,255}{0,028} & \frac{3,386}{0,349} & \frac{0,827}{0,089} & \frac{0,542}{0,059} & \frac{0,827}{0,089} \end{bmatrix}^T$$

Vetor de Coerência =

$$[9,493 \ 9,221 \ 9,645 \ 8,971 \ 9,089 \ 9,687 \ 9,281 \ 9,101 \ 9,281]^T$$

A estimativa do maior autovalor  $\lambda_{\max}$  da matriz paritária é obtida pela média aritmética dos elementos do vetor de coerência, ou seja:

$$\lambda_{\max} = \frac{(9,493 + 9,221 + 9,645 + 8,971 + 9,089 + 9,687 + 9,281 + 9,101 + 9,281)}{9} = 9,308$$

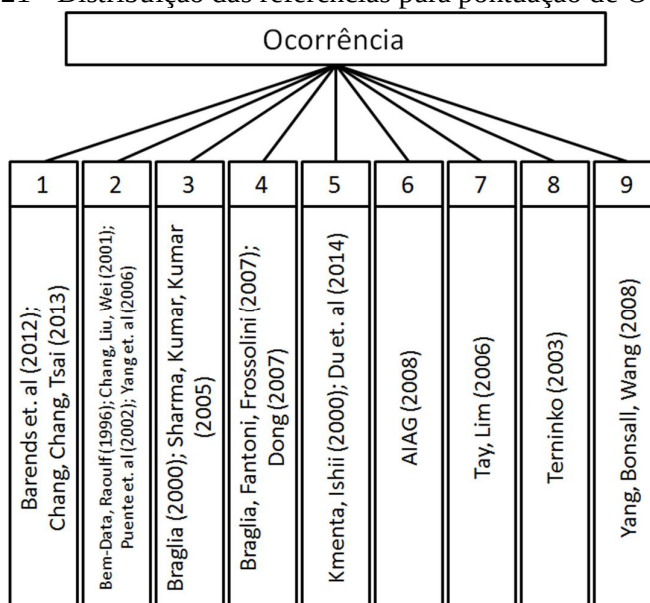
Assim, aplica-se a Equação 2, onde, para  $n = 3$ ,  $RI = 1,45$ . Desta forma, têm-se:

$$CR = \frac{\lambda - n}{(n-1)RI} = \frac{9,308-9}{(9-1) \times 1,45} = 0,032$$

É recomendado que, para valores de  $CR$  acima de 0,20, as comparações sejam revistas (SAATY, 2001). Para os julgamentos relacionados com a comparação das diferentes referências para pontuação da Severidade, apresentada na Tabela 30, tem-se  $CR = 0,032$ , o que valida como coerente os julgamentos realizados pela equipe.

Para a estrutura do processo de comparação das tabelas de referência para pontuação de Ocorrência, são consideradas as tabelas de referência identificadas Seção 2.2.2 do levantamento bibliográfico deste trabalho. Esta distribuição é formada por nove tabelas de referência para atribuição de pontuação de Ocorrência, obtidas em 16 diferentes publicações entre os anos de 1996 e 2014, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Distribuição das referências para pontuação de Ocorrência



Fonte: Dados da Pesquisa

No caso da pontuação a ocorrência, algumas referências trazem a proposta de pontuação a partir de uma razão da probabilidade de ocorrência das falhas, o que foi considerado impróprio por não levar em conta a ocorrência das causas potenciais. Procedimentos estatísticos aplicados aos dados históricos de processos similares e também os registros de tempo médio entre falhas possibilitam uma melhor percepção da razão da ocorrência, diminuindo a subjetividade da análise. Os julgamentos que comparam as tabelas de Ocorrência, assim como aqueles relacionados com as tabelas de Severidade, foram realizados por uma equipe formada por três Engenheiros da Qualidade com experiência na aplicação de

FMEA, com o intuito de se identificar a tabela que proporcione a atribuição de valores mais adequada. As comparações realizadas com a aplicação da Escala Fundamental de Saaty e trazem, por exemplo, a tabela de referência adotada pelos autores Yang, Bonsall e Wang (2008), codificada por O9, é classificada como sendo de fraca importância sobre a tabela de referência adotada pelos autores Braglia, Fantoni e Frossolini (2007) e Sharma, Dong (2007), codificada por O4. Este julgamento levemente favorável O9 em relação a O4, dá pelo fato da tabela codificada por O9 apresentar critérios de taxa de falha anual, o que permite considerar dados históricos, diferente da taxa de falha por quantidade de peças apresentada na tabela codificada por O4. A Tabela 32 apresenta os julgamentos realizados para o critério de pontuação da ocorrência.

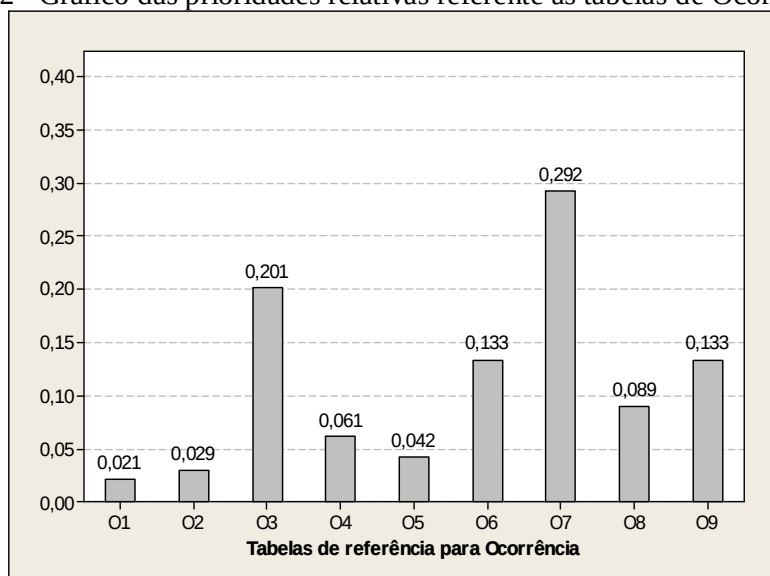
Tabela 32 - Julgamentos dos critérios de pontuação da ocorrência

| Tabelas | Ocorrência |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|         | O1         | O2  | O3  | O4  | O5  | O6  | O7  | O8  | O9  |
| O1      | 1          | 1/2 | 1/7 | 1/4 | 1/3 | 1/6 | 1/8 | 1/5 | 1/6 |
| O2      | 2          | 1   | 1/6 | 1/3 | 1/2 | 1/5 | 1/7 | 1/4 | 1/5 |
| O3      | 7          | 6   | 1   | 4   | 5   | 2   | 1/2 | 3   | 2   |
| O4      | 4          | 3   | 1/4 | 1   | 2   | 1/3 | 1/5 | 1/2 | 1/3 |
| O5      | 3          | 2   | 1/5 | 1/2 | 1   | 1/4 | 1/6 | 1/3 | 1/4 |
| O6      | 6          | 5   | 1/2 | 3   | 4   | 1   | 1/3 | 2   | 1   |
| O7      | 8          | 7   | 2   | 5   | 6   | 3   | 1   | 4   | 3   |
| O8      | 5          | 4   | 1/3 | 2   | 3   | 1/2 | 1/4 | 1   | 1/2 |
| O9      | 6          | 5   | 1/2 | 3   | 4   | 1   | 1/3 | 2   | 1   |

Fonte: Dados da Pesquisa

O valor de *CR* (Taxa de coerência) obtido é igual a 0,027 para o julgamento das tabelas de referência para atribuição de valores de Ocorrência. Figura 22 traz uma apresentação gráfica das prioridades relativas referentes a este julgamento, onde a tabela de referência proposta pelos autores Tay e Lim (2006), codificada por O7, apresenta o valor de aproximadamente 30%, o que indica que esta tabela é mais apropriada para a atribuição dos valores de Ocorrência do que, por exemplo, a tabela de referência sugerida pelos autores Barends et. al (2012) e Chang, Chang e Tsai (2013), codificada por O1 e com valor de aproximadamente 2%.

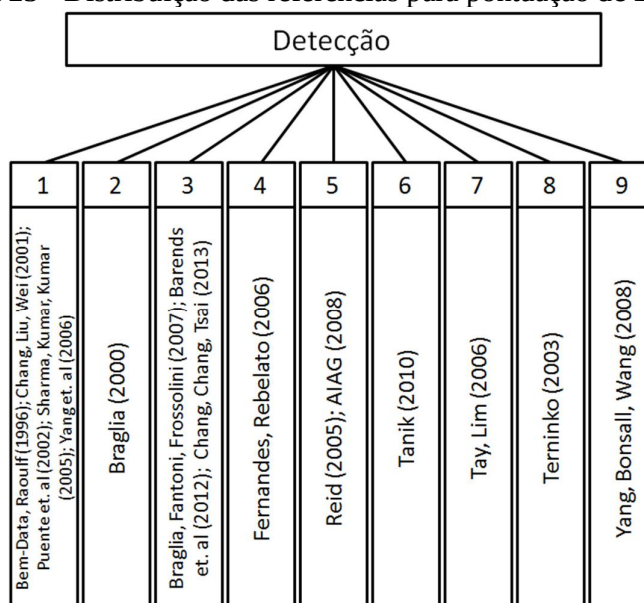
Figura 22 - Gráfico das prioridades relativas referente às tabelas de Ocorrência



Fonte: Dados da Pesquisa

Para a estrutura do processo de comparação das tabelas de referência para pontuação de Detecção, são consideradas as tabelas de referência identificadas Seção 2.2.3 do levantamento bibliográfico deste trabalho. Esta distribuição é formada por nove tabelas de referência, obtidas em 16 diferentes publicações entre os anos de 1996 e 2013, conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 - Distribuição das referências para pontuação de Detecção



Fonte: Dados da Pesquisa

Um aspecto bastante positivo para a pontuação da detecção é a aplicação de possíveis combinações de diferentes métodos de controle para definir a sua pontuação, em contra partida, situações que relatam a detecção da causa da falha, detecção antes do problema e possibilidade de plano de ação foram identificadas como impróprias para finalidade da pontuação da detecção, uma vez que esta está relacionado ao controle de detecção da falha. Os julgamentos que comparam as tabelas de Detecção, assim como aqueles relacionados com as tabelas de Severidade e Ocorrência, foram realizados por uma equipe formada por três Engenheiros da Qualidade com experiência na aplicação de FMEA, com o intuito de se identificar a tabela que proporcione a atribuição de valores mais adequada. As comparações realizadas com a aplicação da Escala Fundamental de Saaty. A Tabela 33 apresenta os julgamentos realizados para o critério de pontuação da detecção. Assim, por exemplo, a tabela de referência proposta pelos autores Reid (2005) e AIAG (2008), codificada por D5, é tida como de forte importância quando comparada com a tabela de referência proposta pelos autores Tay e Lim (2006), codificada por D7. Esta classificação de forte importância se dá pelo fato da tabela codificada por D5 possuir 10 níveis de comparação com a descrição das oportunidades de detecção, ao passo que a tabela codificada por D7 apresenta uma escala de detecção em 6 níveis com critérios que descrevem situações genéricas de controle.

Tabela 33 - Julgamentos dos critérios de pontuação da detecção

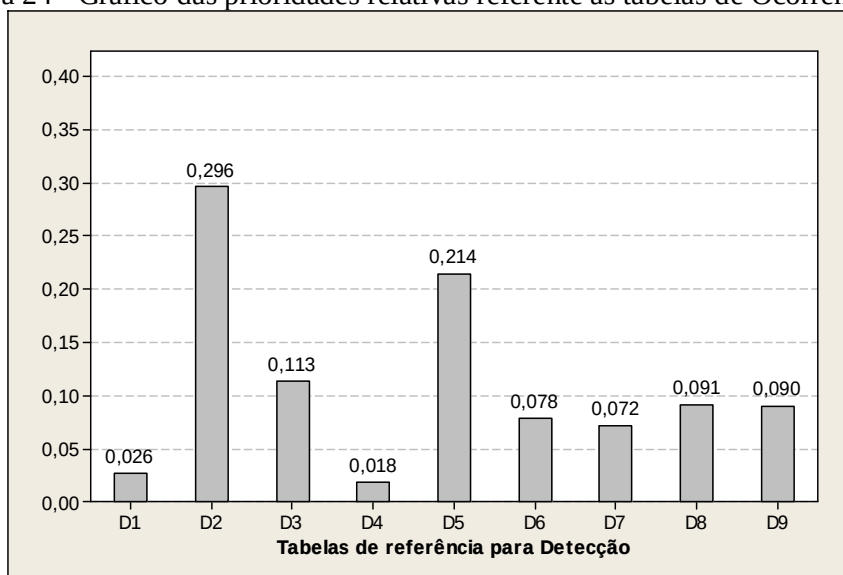
| Tabelas   | Detecção |     |     |    |     |     |     |     |     |
|-----------|----------|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
|           | D1       | D2  | D3  | D4 | D5  | D6  | D7  | D8  | D9  |
| <b>D1</b> | 1        | 1/8 | 1/5 | 2  | 1/7 | 1/3 | 1/4 | 1/2 | 1/6 |
| <b>D2</b> | 8        | 1   | 4   | 9  | 2   | 6   | 5   | 7   | 3   |
| <b>D3</b> | 5        | 1/4 | 1   | 6  | 1/3 | 3   | 2   | 4   | 1/2 |
| <b>D4</b> | 1/2      | 1/9 | 1/6 | 1  | 1/8 | 1/4 | 1/5 | 1/3 | 1/7 |
| <b>D5</b> | 7        | 1/2 | 3   | 8  | 1   | 5   | 4   | 6   | 2   |
| <b>D6</b> | 3        | 1/6 | 1/3 | 4  | 1/5 | 1   | 2   | 1/2 | 4   |
| <b>D7</b> | 4        | 1/5 | 1/2 | 5  | 1/4 | 1/2 | 1   | 1/3 | 3   |
| <b>D8</b> | 2        | 1/7 | 1/4 | 3  | 1/6 | 2   | 3   | 1   | 5   |
| <b>D9</b> | 6        | 1/3 | 2   | 7  | 1/2 | 1/4 | 1/3 | 1/5 | 1   |

Fonte: Dados da Pesquisa

O valor de *CR* (Taxa de coerência) obtido é igual a 0,175 para o julgamento das tabelas de referência para atribuição de valores de Detecção. Figura 24 traz uma apresentação gráfica das prioridades relativas referentes a este julgamento, onde a tabela de referência proposta por

Braglia (2000), codificada por D2, apresenta o valor de aproximadamente 30%, o que indica que esta tabela é mais apropriada para a atribuição dos valores de Detecção do que, por exemplo, a tabela de referência sugerida pelos autores Fernandes e Rebelato (2006), codificada por D4 ou mesmo a tabela proposta pelos autores Ben-Daya e Raouf (1996); Chang, Liu e Wei (2001); Puente *et al.* (2002) e Yang *et al.* (2006) codificada por D1, ambas com valor de aproximadamente 2%.

Figura 24 - Gráfico das prioridades relativas referente às tabelas de Ocorrência



Fonte: Dados da Pesquisa

Desta forma, têm-se identificadas as tabelas mais adequadas para referência de atribuição dos valores de Severidade, Ocorrência e Detecção. Para a Pontuação de Severidade, a tabela apresentada por AIAG (2008), caracterizada por identificar o efeito tanto no processo do cliente quanto no usuário do veículo, foi classificada como mais adequada com valor de prioridade relativa igual a 0,349. Já para a pontuação de Ocorrência, a tabela apresentada por Tay e Lim (2006), que possui os níveis baseados na escala de ocorrência dentro de um determinado período de tempo, sendo desde uma vez por ano para pontuação igual a um, até uma condição extrema de muitas vezes por turno, com pontuação igual a dez, foi classificada como mais adequada com valor de prioridade relativa igual a 0,292. No caso da pontuação de Detecção, a tabela apresentada por Braglia (2000), que associa a possibilidade de detecção pela combinação de quatro diferentes tipos de intervenção no processo, foi classificada como mais adequada com valor de prioridade relativa igual a 0,296. O Quadro 6 apresenta uma síntese das tabelas identificadas para cada pontuação.

Quadro 6 - Tabelas de referência para pontuação identificadas como mais adequadas para aplicação em FMEA de Processo

| <b>Pontuação</b> | <b>Tabela identificada como mais adequada</b> |
|------------------|-----------------------------------------------|
| Severidade       | AIAG (2008)                                   |
| Ocorrência       | Tay e Lim (2006)                              |
| Detecção         | Braglia (2000)                                |

Fonte: Dados da Pesquisa

Com a aplicação dos critérios de pontuação apresentados no Quadro 6, baseados nos efeitos das falhas, causas e controles realmente relacionados com a função da atividade de inspeção de recebimento, no FMEA do estudo apresentado na Figura 17 tem-se a quantificação dos riscos de forma mais adequada, sendo possível então identificar os valores de NPR para cada situação, conforme apresentado na Figura 25.

Com a atribuição dos valores de Severidade, Ocorrência e Detecção, e posterior cálculo do NPR, apresentado na Figura 25, tem-se o atingimento do segundo objetivo específico desta tese, que é identificar na literatura as tabelas de referência mais apropriadas para a aplicação de FMEA de Processo, visando diminuir dúvidas nas atribuições de valores de Severidade, Ocorrência e Detecção. Na Seção 5 deste trabalho serão apresentadas as métricas utilizadas para identificação de regras para a recomendação de ações de melhoria e o FMEA de inspeção de recebimento será reavaliado considerando tais ações recomendadas.



Figura 25 - Formulário FMEA de Processo atualizado com pontuação, porém sem ações recomendadas

| Item / Função                            | Modo de Falha Potencial             | Efeito(S) Potencia(S) de Falha        | S E V E | C L A S S | Causa Potencial ( 6M ) Mecanismos          | O C O R R | Controle de Prevenção Atual                       | Controle de Detecção Atual                     | D E T C | N P R | Ações Recomen-dadas | Responsabili-dade pelas ações recomenda-das e prazos envolvidos | Ações Resultantes |         |           |         |       |
|------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------|-----------|--------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------|-------|---------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|---------|-----------|---------|-------|
|                                          |                                     |                                       |         |           |                                            |           |                                                   |                                                |         |       |                     |                                                                 | Ação Tomada       | S E V E | O C O R R | D E T C | N P R |
| Inspeção de recebimento da matéria-prima | Aprovar chapa com comprimento menor | Falta de material na última peça      | 5       |           | Material recebido fora do expediente       | 7         | -                                                 | Auditoria periódica da inspeção de recebimento | 4       | 140   |                     |                                                                 |                   |         |           |         |       |
|                                          |                                     |                                       |         |           | Utilização de instrumento inadequado       | 1         | Disponibilizar apenas trena e paquímetro no local | Auditoria periódica da inspeção de recebimento | 4       | 20    |                     |                                                                 |                   |         |           |         |       |
|                                          | Aprovar chapa com espessura menor   | Produção de peças com espessura menor | 8       |           | Material recebido fora do expediente       | 7         | -                                                 | Auditoria periódica da inspeção de recebimento | 4       | 224   |                     |                                                                 |                   |         |           |         |       |
|                                          |                                     |                                       |         |           | Utilização de instrumento inadequado       | 1         | Disponibilizar apenas trena e paquímetro no local | Auditoria periódica da inspeção de recebimento | 4       | 32    |                     |                                                                 |                   |         |           |         |       |
|                                          | Aprovar chapa empenada              | Impossibilidade de corte laser        | 4       |           | Material recebido fora do expediente       | 7         | -                                                 | Auditoria periódica da inspeção de recebimento | 4       | 112   |                     |                                                                 |                   |         |           |         |       |
|                                          | Aprovar material oxidado            | Geração de rebarbas no corte laser    | 4       |           | Recebimento em local de pouca visibilidade | 4         | Iluminação adequada para inspeção visual          | Auditoria periódica da inspeção de recebimento | 4       | 64    |                     |                                                                 |                   |         |           |         |       |
|                                          |                                     |                                       |         |           |                                            |           |                                                   |                                                |         |       |                     |                                                                 |                   |         |           |         |       |
|                                          |                                     |                                       |         |           |                                            |           |                                                   |                                                |         |       |                     |                                                                 |                   |         |           |         |       |

Fonte: Dados da Pesquisa

## 5. ANÁLISE CORRETIVA REFERENTE À DECISÃO E AÇÕES DE MELHORIA EM FMEA

Esta Seção constitui no terceiro e último ciclo da pesquisa-ação, e desenvolve um estudo da análise corretiva referente à decisão e ações de melhoria. Em FMEA, as decisões sobre a forma de melhorar uma operação baseiam-se no NPR para a avaliação de risco (XIAO *et al.*, 2011). Em situações em que o risco potencial é identificado como superior a determinado nível, uma ação deve ser recomendada para minimizá-lo. Devido à sua facilidade intrínseca, método NPR é amplamente adotado na prática industrial (BRAGLIA, FANTONI e FROSOLINI, 2007), destacando as vantagens: É fácil de usar e entender, devido à sua simplicidade; As ações são bem documentadas e devidamente formatadas; Possui uma sistemática para a tomada de decisão rápida. No entanto, devido a algumas fragilidades como as expostas na Seção 2.4, a dependência única do NPR pode induzir a equipe de FMEA a desperdiçar valiosos recursos, definição de prioridades onde não há pontos críticos e deixando falhas críticas fora do campo de ações (KESKIN e ÖZKAN, 2009).

Um aumento na diversidade de critérios tem sido notado, uma vez que a orientação incluída na quarta edição do Manual de FMEA (AIAG, 2008) , que recomenda a Nota de Corte<sup>8</sup> em NPR não deva ser o único critério para recomendação de ações. Esses critérios, em alguns casos, não são claramente definidos e conhecidos pela equipe de FMEA, o que resulta em um aspecto de subjetividade na tomada de decisão sobre a ação. Assim, esta definição de critérios para recomendação de ações em FMEA de Processo torna-se uma condição muito específica de cada empresa. Em um estudo realizado em indústrias automotivas brasileiras, Estorilio e Posso (2010) observaram que algumas empresas podem recomendar ações quando o NPR é de 40, outras quando Severidade é sete. Isso destaca o fato de que as regras para a indústria automotiva no Brasil não são claras, sugerindo a existência de uma grande variedade de critérios. Com esta aplicação generalizada, presume-se que a diversidade de critérios para recomendação de ações seja também proporcionalmente extensiva. Com base nesta condição, foi realizada uma pesquisa estruturada em empresas do segmento automotivo do estado de São Paulo, com o objetivo de identificar o tamanho de tal diversidade, a fim de se

---

<sup>8</sup> Nota de Corte: Valor limite definido para NPR, onde para todas as situações onde o NPR for maior do que este valor, deve ser recomendada no FMEA uma ação de melhoria para a redução do risco.

compreender como ocorre essa variação e, se há algum ponto de consenso entre as empresas (AGUIAR; SALOMON, 2014)<sup>9</sup>.

### 5.1 PESQUISA EM EMPRESAS AUTOMOTIVAS DO ESTADO DE SÃO PAULO

Esta pesquisa é classificada como descritiva (FORZA, 2002) por estar em uma condição em que as unidades de análise se dispõem de forma adequada para as questões; pelos entrevistados serem representativos da unidade de análise; pelo o tamanho da amostra ser suficiente para representar a população de interesse e também devido ao elevado nível de taxa de participação (MIGUEL; HO, 2010). O Quadro 7 apresenta os pontos detalhados relativos às características de uma pesquisa descritiva.

Quadro 7 - Pontos detalhados relativos às características de uma pesquisa descritiva

| Elemento de pesquisa | Característica                                                | Pontos detalhados                                                                                                                 |
|----------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Unidades de análise  | Claramente definidas e adequadas para as questões             | O critério para recomendação de ações em FMEA é um aspecto aberto que pode resultar em resultados e interpretações diferentes     |
| Entrevistados        | Devem representar as unidades de análise                      | Pessoas que trabalham em empresas certificadas ISO / TS 16.949 e usam FMEA                                                        |
| Tamanho da amostra   | Deve ser suficiente para representar a população de interesse | A pesquisa foi conduzida em 48 empresas, aproximadamente 5% das 880 empresas com certificação ISO/TS 16949 no Estado de São Paulo |
| Taxa de participação | Deve ser maior que 50% da população alvo                      | 48 empresas foram consultadas, o retorno foi obtido em 44 casos, o que significa uma taxa de resposta superior a 90%              |

Fonte: (FORZA, 2002)

Neste tipo de abordagem de pesquisa realiza-se a avaliação em uma amostra de um problema a ser investigado, com o propósito de se extrair conclusões acerca desta amostra (MIGUEL; HO, 2010). É preciso garantir que esta amostra seja representativa da população (COSTA NETO, 2002) e para avaliar a representatividade desta amostra, é aplicado o cálculo de amostra mínima para tal levantamento, de acordo com a Equação 3.

$$A = \frac{N \times Z^2 \times p \times (1-p)}{(N-1) \times e^2 + Z^2 \times p \times (1-p)} \quad (3)$$

<sup>9</sup> Este estudo gerou uma publicação científica no *International Conference on Quality Engineering and Management*. Em Guimarães - Portugal: 2014

Onde “A” é o tamanho da amostra a calcular; “N” é o Tamanho da população, neste caso as empresas com certificação ISO / TS 16949 no estado de São Paulo; “Z” É o desvio do valor médio aceitável para alcançar o nível de confiança desejado, para o nível de confiança 95%,  $Z = 1,96$ ; “e” é a margem de erro máximo, aqui admitido em 5%; “p” é a proporção da uniformidade da amostra, neste caso adotado 3% uma vez que todas as empresas possuem o mesmo tipo de certificação para o Sistema de Gestão da Qualidade.

Os dados de empresas certificadas com ISO/TS 16949 disponibilizados anualmente pela ISO Survey (2015) não levam em consideração a distribuição das empresas por estado, mas sim por países. Para uma estimativa do número de empresas com certificação ISO/TS 16949 no estado de São Paulo, foi realizada uma busca no site do SINDIPEÇAS<sup>10</sup>, onde aproximadamente 78% dos associados são empresas automotivas do estado de São Paulo. Assim, para a validação da representatividade da amostra, adotou-se esta mesma proporção, porém com base no número da ISO Survey (2015), assumindo-se que no estado de São Paulo o número de empresas com certificação ISO/TS 16949 é 880. Assim, têm-se a amostra:

$$A = \frac{880 \times 1,96^2 \times 0,03 \times (1 - 0,03)}{(880 - 1) \times 0,05^2 + 196^2 \times 0,03 \times (1 - 0,03)} = 42,60$$

O valor de  $A = 42,60$  valida a representatividade da amostra de 44 empresas com certificação ISO/TS 16949 pesquisadas no estado de São Paulo considerando uma margem de erro de 5% com nível de confiança de 95%.

Para a coleta dos dados da pesquisa, primeiramente um convite pessoal foi realizado por meio de ligação telefônica e agendamento para uma entrevista estruturada, com base em um roteiro que foi enviado na sequencia. Este roteiro, que é apresentado no APÊNDICE C, foi desenvolvido e validado por um grupo formado por três engenheiros da qualidade com experiência tanto em FMEA de Processo quanto em auditorias do sistema de gestão da qualidade ISO/TS 16949, e é composto por tópicos relacionados ao perfil da empresa e também por questões relacionadas aos critérios utilizados para as recomendações de ações em FMEA. Iniciou-se então a rodada de entrevistas, via telefone, onde cada entrevista realizada durou cerca de quatro minutos, com todas entrevistas concluídas num prazo de 10 dias,

---

<sup>10</sup> Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores que reúne cerca de 500 associados, que fornecem para todas as montadoras brasileiras – [www.sindipecas.org.br](http://www.sindipecas.org.br)

Devido ao agendamento prévio, a taxa de participação na pesquisa foi de mais de 90%, caracterizando-se suficiente para a representação das unidades de análise. A pesquisa foi aplicada em empresas do segmento automotivo do estado de São Paulo com o Sistema de Gestão da Qualidade com certificação ISO/TS 16949. Esta amostra é formada em sua maioria por empresas de 100 a 300 funcionários, com gama de produtos variando entre borrachas, estampados, fixadores, tubos e usinados. O Quadro 8 apresenta um mapeamento do perfil das empresas que participaram da pesquisa, considerando ainda aspectos como nível de atuação no segmento automotivo, gama de produtor e também se há aplicação de FMEA de Projeto.

Quadro 8 - Mapeamento do perfil das empresas pesquisadas

| Característica                     | Grupo           | Quantidade | Porcentagem | Total |
|------------------------------------|-----------------|------------|-------------|-------|
| Número de funcionários             | < 100           | 8          | 18%         | 44    |
|                                    | de 101 a 200    | 17         | 39%         |       |
|                                    | de 201 a 300    | 8          | 18%         |       |
|                                    | de 301 a 400    | 6          | 14%         |       |
|                                    | de 401 a 500    | 3          | 7%          |       |
|                                    | > 500           | 2          | 5%          |       |
| Localização                        | Grande SP       | 20         | 45%         |       |
|                                    | Interior de SP  | 24         | 55%         |       |
| Produtos                           | Borrachas       | 4          | 9%          |       |
|                                    | Estampados      | 12         | 27%         |       |
|                                    | Fixadores       | 13         | 30%         |       |
|                                    | Tubos           | 6          | 14%         |       |
|                                    | Usinados        | 9          | 20%         |       |
| Tempo de certificação ISO/TS 16949 | de 1 a 3 anos   | 4          | 9%          |       |
|                                    | de 4 a 6 anos   | 19         | 43%         |       |
|                                    | de 7 a 9 anos   | 14         | 32%         |       |
|                                    | de 10 a 12 anos | 7          | 16%         |       |
| Nível do setor automotivo          | Tier 1          | 22         | 50%         |       |
|                                    | Tier 2          | 22         | 50%         |       |
| Aplicação de FMEA de projeto       | Sim             | 8          | 18%         |       |
|                                    | Não             | 36         | 82%         |       |

Fonte: Dados da Pesquisa

Como proposição para esta pesquisa tem-se a expectativa de que os critérios mais bem definidos para a recomendação de ações em FMEA de Processo estejam relacionados três fatores em específico, todos em situações que proporcionam o aumento da experiência em aplicação de FMEA de Processo, consequentemente no tipo de critério usado em recomendações de ações. O primeiro deles é o caso de ter o FMEA de Processo submetido a avaliações externas. O segundo tem ligação a outras rotinas de FMEA, tais como FMEA de

Projeto. E o terceiro considera a possibilidade de pessoas da equipe de FMEA já terem trabalhado em outras empresas que também aplicam FMEA.

Tanto as empresas *Tier 1*<sup>11</sup>, por tendem por sofrerem constantes interações com as montadoras em situações de desenvolvimento, quanto as empresas com mais tempo de certificação ISO/TS 16949, por possuírem um Sistema de Gestão da Qualidade com mais ciclos de avaliações em auditorias de certificação, tendem a ter uma rotina de FMEA mais evoluída, por intervenções externas. Existe também a expectativa de que empresas que também possuem em seu escopo de certificação o desenvolvimento de projetos, tenham FMEA de Processo mais evoluídos, devido à interface com o FMEA de Projeto. Ainda há a condição de que empresas que se concentram em uma mesma região, no caso Grande São Paulo, possuam rotinas de FMEA de Processo mais evoluídas pelo fato das pessoas que compõem a equipe terem tido experiência com FMEA em outras empresas.

Pelo que foi apurado, são adotados vários critérios específicos, tendo em conta vários tipos de combinação entre as atribuições de valores para Severidade, Ocorrência, Detecção e NPR. Foram observados casos com mais de um critério e também casos sem definição de valores fixos, com um total de 16 combinações diferentes. Considerando-se os valores de pontuação que formam as regras, cada situação foi observada apenas uma vez, com destaque para a variedade de critérios dentro da amostra da pesquisa. Com base nesta coleta de dados, os critérios foram divididos em três tipos, como mostrado no Quadro 9.

---

<sup>11</sup> *Tier 1*: Fornecedor do primeiro nível da cadeia automotiva

Quadro 9 - Classificação dos critérios para recomendação de ações

| <b>Tipo do Critério</b> | <b>Definição</b>                                                                                                          | <b>Exemplo</b>                                                                                                       |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Critério Único          | Quando, a partir da resposta informada, ficou entendido que há apenas um critério definido para a recomendação de ações.  | "(...) é recomendada ação para os casos com valor de NPR > 170 (...)"                                                |
| Critério Escalonado     | Quando, a partir da resposta informada, ficou entendido que há mais de um critério definido para a recomendação de ações. | "(...) é recomendada ação para os casos com valor de NPR > 170, e também para os casos de Severidade $\geq 8$ (...)" |
| Sem Critério            | Quando, a partir da resposta informada, ficou entendido que não há critério definido para a recomendação de ações.        | "(...) não há uma padronização do critério, podendo ser por diversos tipos de análise (...)".                        |

Fonte: Dados da Pesquisa

## 5.2 ANÁLISE DOS DADOS DA PESQUISA

Entre as 44 respostas, nota-se um equilíbrio no tipo de critérios utilizados pelas empresas, uma vez que 21 empresas adotam critérios únicos, 22 adotam critérios escalonados. No entanto, uma empresa relatou a trabalhar sem critérios definido, portanto, apenas 43 respostas foram consideradas. Um mapeamento de todas as respostas é apresentado no APÊNDICE D.

Em alguns dos casos classificados como critério único, houve uma segunda possibilidade de definição de tomada de ação, mas com base em situações específicas, tais como "Reunião da Equipe"; "Quando ocorre não conformidade"; "Alteração do processo"; "Características identificadas pelo Cliente"; etc. Para estas situações, entendeu-se que não há um segundo critério definido como uma regra objetiva, por tratar-se de situações específicas, sem considerar valores ou pontuações na determinação das prioridades. Notou-se ainda que algumas respostas genéricas foram apresentadas. Para as respostas que apenas relataram que a definição é feita de acordo com o Manual AIAG FMEA 4ª Edição (tópico "Determinar Ação Prioritária"; Capítulo IV, p 103), entendeu-se que se aplica o único critério para a recomendação de ações, a partir dos valores de severidade ( $S = 9$  ou  $10$ ).

Entre as 21 empresas que adotam critério único para a recomendação de ações em FMEA de Processo, pouco menos de 70% corresponde a empresas com até 300 funcionários, não havendo destaque em relação à localização. Quanto ao tipo de produto, a maioria atua no ramo de Estampados ou Fixadores e aproximadamente 60% possui o Sistema de Gestão da Qualidade com até 6 anos de certificação. No que se diz respeito ao nível de atuação no

segmento automotivo, a maioria absoluta se concentra em empresas *Tier 2*, e o fator de relação entre FMEA de Processo e FMEA de Projeto se mantém proporcional ao da amostra. O Quadro 10 apresenta o mapeamento do perfil das empresas que adotam critério único para a recomendação de ações em FMEA de Processo.

Quadro 10 - Mapeamento do perfil das empresas que adotam critérios únicos para a recomendação de ações em FMEA de Processo

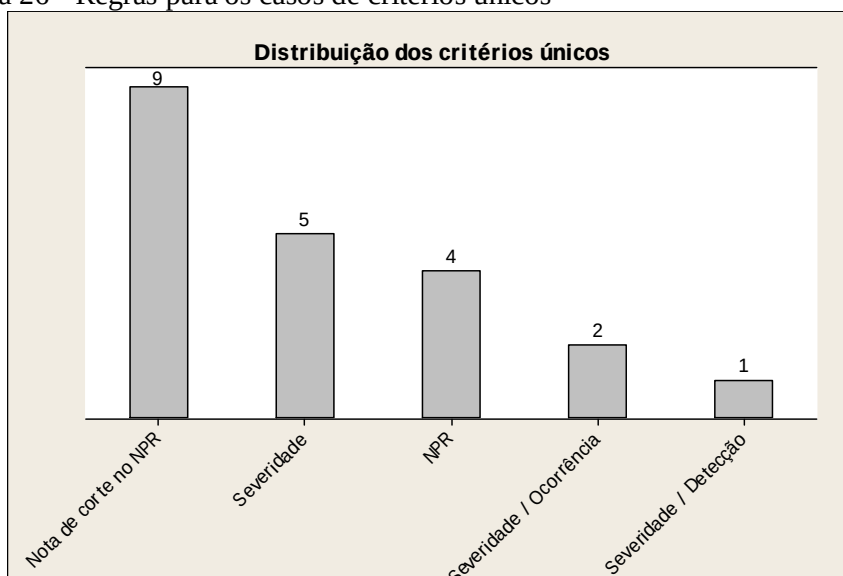
| Característica                     | Grupo           | Quantidade | Porcentagem | Total |
|------------------------------------|-----------------|------------|-------------|-------|
| Número de funcionários             | < 100           | 4          | 19%         | 21    |
|                                    | de 101 a 200    | 10         | 48%         |       |
|                                    | de 201 a 300    | 3          | 14%         |       |
|                                    | de 301 a 400    | 1          | 5%          |       |
|                                    | de 401 a 500    | 2          | 10%         |       |
|                                    | > 500           | 1          | 5%          |       |
| Localização                        | Grande SP       | 11         | 52%         |       |
|                                    | Interior de SP  | 10         | 48%         |       |
| Produtos                           | Borrachas       | 3          | 14%         |       |
|                                    | Estampados      | 5          | 24%         |       |
|                                    | Fixadores       | 6          | 29%         |       |
|                                    | Tubos           | 4          | 19%         |       |
|                                    | Usinados        | 3          | 14%         |       |
| Tempo de certificação ISO/TS 16949 | de 1 a 3 anos   | 3          | 14%         |       |
|                                    | de 4 a 6 anos   | 10         | 48%         |       |
|                                    | de 7 a 9 anos   | 7          | 33%         |       |
|                                    | de 10 a 12 anos | 1          | 5%          |       |
| Nível do setor automotivo          | Tier 1          | 2          | 10%         |       |
|                                    | Tier 2          | 19         | 90%         |       |
| Aplicação de FMEA de projeto       | Sim             | 4          | 19%         |       |
|                                    | Não             | 17         | 81%         |       |

Fonte: Dados da Pesquisa

Nestes 21 casos de critérios únicos, a maioria das situações observadas define o valor nota de corte de NPR como a única regra para recomendar as ações. Além disso, observou-se a utilização de outros critérios, tais como: Severidade; NPR (sem nota de corte); Combinação de Severidade e Ocorrência; Combinação de Severidade e Detecção. A Figura 26 apresenta a distribuição de tais regras para os casos de critérios únicos.



Figura 26 - Regras para os casos de critérios únicos



Fonte: Dados da Pesquisa

Assim como no caso de uma segunda possibilidade de definição de tomada de ação com base em situações específicas anteriormente descritas a respeito dos critérios únicos, há casos de nova possibilidade de também recomendar ações para os casos de critérios escalonados. Em algumas das respostas foi possível identificar inclusive um terceiro nível de possibilidade de tomada de ações, baseadas em situações que não consideram os valores ou as pontuações específicas, entretanto estas situações não foram consideradas como critérios objetivos para recomendação ações.

Entre as 22 empresas que adotam critérios escalonados para a recomendação de ações em FMEA de Processo, cerca de 70% corresponde a empresas de 100 a 400 funcionários, também não havendo destaque em relação à localização geográfica. Aproximadamente 60% possui o Sistema de Gestão da Qualidade com mais de 7 anos de certificação. No que se diz respeito ao nível de atuação no segmento automotivo, a maioria absoluta se concentra em empresas *Tier 1*. O fator de relação entre FMEA de Processo e FMEA de projeto e também a questão do tipo de produto, o mapeamento se mantém proporcional ao da amostra. O Quadro 11 apresenta o mapeamento do perfil das empresas que adotam critérios escalonados para a recomendação de ações em FMEA de Processo.

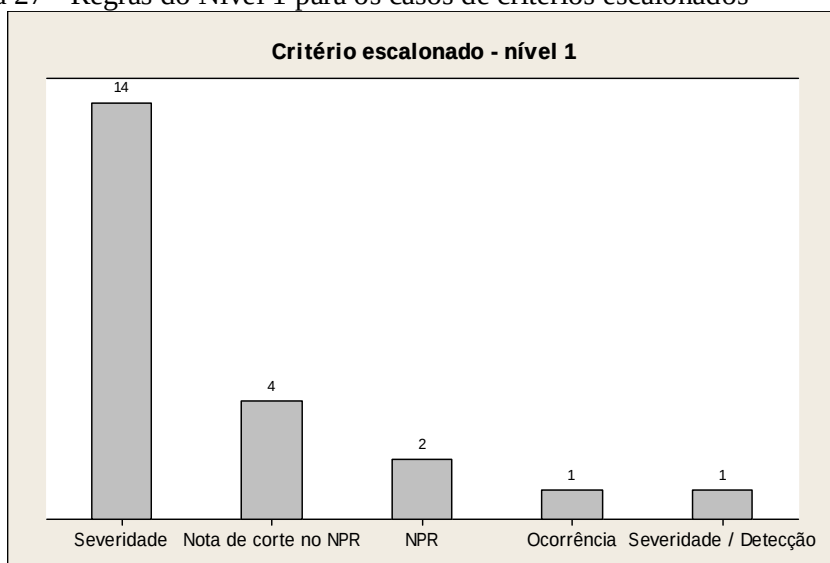
Quadro 11 - Mapeamento do perfil das empresas que adotam critérios escalonados para a recomendação de ações em FMEA de Processo

| Característica                     | Grupo           | Quantidade | Porcentagem | Total |
|------------------------------------|-----------------|------------|-------------|-------|
| Número de funcionários             | < 100           | 4          | 18%         | 22    |
|                                    | de 101 a 200    | 6          | 27%         |       |
|                                    | de 201 a 300    | 5          | 23%         |       |
|                                    | de 301 a 400    | 5          | 23%         |       |
|                                    | de 401 a 500    | 1          | 5%          |       |
|                                    | > 500           | 1          | 5%          |       |
| Localização                        | Grande SP       | 9          | 41%         |       |
|                                    | Interior de SP  | 13         | 59%         |       |
| Produtos                           | Borrachas       | 1          | 5%          |       |
|                                    | Estampados      | 6          | 27%         |       |
|                                    | Fixadores       | 7          | 32%         |       |
|                                    | Tubos           | 2          | 9%          |       |
|                                    | Usinados        | 6          | 27%         |       |
| Tempo de certificação ISO/TS 16949 | de 1 a 3 anos   | 1          | 5%          |       |
|                                    | de 4 a 6 anos   | 8          | 36%         |       |
|                                    | de 7 a 9 anos   | 7          | 32%         |       |
|                                    | de 10 a 12 anos | 6          | 27%         |       |
| Nível do setor automotivo          | Tier 1          | 20         | 91%         |       |
|                                    | Tier 2          | 2          | 9%          |       |
| Aplicação de FMEA de projeto       | Sim             | 4          | 18%         |       |
|                                    | Não             | 18         | 82%         |       |

Fonte: Dados da Pesquisa

Entre os 22 casos identificados como critérios escalonados, a maior parte das situações observadas apresenta a Severidade como primeira regra (Nível 1) para recomendar as ações. No entanto, foi possível observar outros critérios, tais como: Nota de corte de NPR; NPR (sem nota de corte); Ocorrência; Combinação de Severidade e Detecção. A Figura 27 apresenta a distribuição destas regras para os casos no Nível 1 nas respostas classificadas como critérios múltiplos.

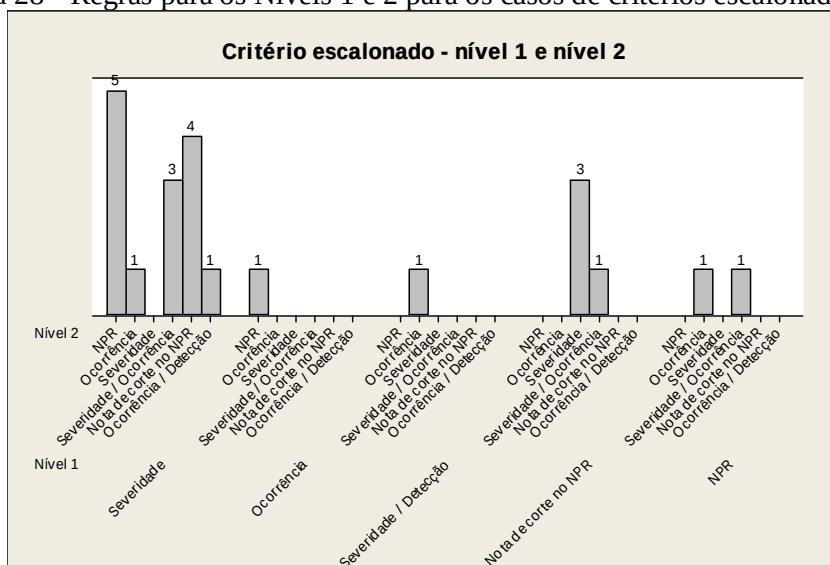
Figura 27 - Regras do Nível 1 para os casos de critérios escalonados



Fonte: Dados da Pesquisa

Ainda referindo-se aos casos de critérios escalonados, há um desdobramento para um segundo nível, em cada situação identificada no Nível 1. Nota-se que para o caso de Severidade como primeira regra para recomendação de ações, a maioria dos casos apresenta NPR (com ou sem nota de corte) como segunda regra. Dentro desta divisão de níveis, foi ainda observada a adoção de outros critérios para o Nível 2, tais como: Ocorrência; Severidade; Combinação de Gravidade e Ocorrência; Combinando Ocorrência e Detecção. A Figura 28 mostra a distribuição destas regras para os Níveis 1 e 2 dos critérios múltiplos.

Figura 28 - Regras para os Níveis 1 e 2 para os casos de critérios escalonados



Fonte: Dados da Pesquisa

Entre as 43 respostas consideradas neste levantamento, as respostas de 14 empresas não informam os valores de pontuação (seja para Severidade, Ocorrência, Detecção ou mesmo NPR) que compõem os critérios, sejam eles simples ou múltiplos critérios. Para estes 14 casos, entendeu-se que os critérios possuem valores não definidos, o que de certa forma ainda aumenta a incerteza na definição da necessidade de tomada de ações. As outras 25 respostas foram classificadas como completas, já que relatam os valores que determinam a necessidade de recomendar ações. Havia ainda quatro situações em que as recomendações de ações são feitas para os cinco maiores valores de NPR. As regras e os valores de critérios únicos e escalonados são apresentados no Quadro 12 e no Quadro 13, respectivamente.

Quadro 12 - Regras e valores para critérios únicos

| #  | Regra                | Valor     |
|----|----------------------|-----------|
| 23 | Nota de corte em NPR | NPR > 100 |
| 24 | Nota de corte em NPR | NPR > 140 |
| 26 | Nota de corte em NPR | NPR > 60  |
| 28 | Severidade           | S > 8     |
| 29 | Nota de corte em NPR | NPR > 100 |
| 30 | Nota de corte em NPR | NPR > 72  |
| 31 | Severidade           | S > 8     |
| 32 | Nota de corte em NPR | NPR > 70  |
| 33 | Severidade           | S > 8     |
| 34 | Nota de corte em NPR | NPR > 150 |
| 35 | Nota de corte em NPR | NPR > 130 |
| 36 | Severidade           | S > 8     |
| 37 | Nota de corte em NPR | NPR > 130 |
| 42 | Severidade           | S > 8     |

Fonte: Dados da Pesquisa

Quadro 13 - Regras e valores para critérios escalonados

| #  | Regra para Nível 1    | Valores para Nível 1 | Regra para Nível 2      | Valores para Nível 2 |
|----|-----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| 3  | Severidade / Detecção | $S > 8$ e $D > 8$    | Ocorrência              | $O > 4$              |
| 4  | Nota de corte em NPR  | $NPR > 168$          | Severidade              | $S > 8$              |
| 7  | Nota de corte em NPR  | $NPR > 80$           | Severidade / Ocorrência | $S > 8$ e $O > 7$    |
| 8  | Severidade            | $S > 7$              | Nota de corte em NPR    | $NPR > 200$          |
| 9  | Severidade            | $S > 8$              | Nota de corte em NPR    | $NPR > 120$          |
| 10 | Severidade            | $S > 7$              | Nota de corte em NPR    | $NPR > 125$          |
| 14 | Severidade            | $S > 6$              | Ocorrência / Detecção   | $O \times D > 17$    |
| 15 | Severidade            | $S > 8$              | Severidade / Ocorrência | $S > 4$ e $O > 3$    |
| 16 | Severidade            | $S > 8$              | Severidade / Ocorrência | $S > 4$ e $O > 3$    |
| 17 | Nota de corte em NPR  | $NPR > 100$          | Severidade              | $S > 8$              |
| 22 | Severidade            | $S > 7$              | Nota de corte em NPR    | $NPR > 112$          |

Fonte: Dados da Pesquisa

### 5.3 RESULTADOS DA PESQUISA

Executando compilação dos dados da pesquisa, foi possível realizar duas comparações com os critérios utilizados, que se combinados, podem ser apresentados como a solução mais adequada para a unificação das negociações. O primeiro é a comparação entre critérios únicos e escalonados; o outro envolve os critérios com e sem valores definidos.

A adoção de critérios únicos não estaria em desacordo com a 4ª Edição manual AIAG FMEA, no entanto, este recomenda um critério progressivo, em duas regras específicas em que a primeira regra é obrigatória e a segunda não. A primeira regra é específica para situações com pontuação de Severidade superior a oito, com o texto: "Quando o valor de Severidade é igual a nove ou dez, é imperativo que a equipe garanta que o risco seja resolvido por meio de controles atuais ou as ações recomendadas (AIAG, 2008)"; A segunda regra é projetada para situações de Severidade com pontuação menor ou igual a oito, com o texto: "Para os modos de falha com a Severidade de oito ou menos, a equipe deve considerar as causas que têm classificações mais elevadas de ocorrência ou detecção (AIAG, 2008)". Assim, entende-se que a aplicação de uma solução com critérios escalonados seria uma melhor alternativa em comparação com os critérios únicos (incluindo quatro situações com recomendação de ações para os cinco mais altos valores de NPR), que foi identificado em 22 das 43 respostas ponderadas.

Crítérios abertos, que não consideram a definição de valores, não estariam em desacordo com o quarto Manual 4ª Edição AIAG FMEA, mas proporcionariam um ambiente

com o processo de tomada de decisão com base em uma maior imprecisão. Portanto, a definição de uma regra baseada na análise crítica, ou outro com base em aspectos não quantitativos de avaliação pode levar a uma falsa definição de prioridades, o que aumenta muito as chances de não se definir um esforço adicional para redução de riscos. Assim, entendeu-se que a aplicação de um critério com base nos valores seria a melhor alternativa em relação àquelas onde não há valores definidos, que foi identificado em 25 das 43 respostas consideradas.

Com base nestas considerações, conclui-se que a combinação mais adequada para se tomar a decisão sobre a necessidade de recomendação ações seria um critério escalonado, formado por duas regras definidas de acordo com a pontuação de Severidade. Entre as características do perfil da empresa levantadas como proposição para a pesquisa, o que foi relacionado com o nível de atuação no segmento automotivo foi validado, uma vez que 90% das empresas que adotam critério escalonado são *Tier 1*. Também foi validada a questão do tempo de certificação ISO/TS 16949. Levando em consideração o ciclo de certificação, a maioria das empresas que estão em seu primeiro ciclo, apresentam critério único para recomendação, ao passo que das sete empresas que encontram-se no quarto ciclo, ou seja, com mais de dez anos de certificação ISO/TS 16949, adotam o critério escalonado. Em relação à aplicação de FMEA de Projeto a distribuição das empresas que adotam critério único ou escalonado se mantém proporcional ao da amostra, onde esta característica não pode ser validada dentro das proposições iniciais por apresentar-se comportamento indiferente nos dois cenários. Referente ao aspecto localização, a maioria das empresas localizadas no interior adota o critério escalonado, contrariando o que foi inicialmente levantado. O Quadro 14 apresenta a síntese das proposições levantadas e respectivas validações.

Quadro 14 - Proposições levantadas e respectivas validações

| <b>Perfil da empresa</b>              | <b>Proposição</b>                                                                                       | <b>Pressuposto</b>                                                                                                 | <b>Validação</b> |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Nível de atuação na cadeia automotiva | As empresas <i>Tier 1</i> possuem FMEA de Processo mais bem aprimorados que as empresas <i>Tier 2</i> . | Maior possibilidade de ter o FMEA de Processo submetido a avaliações externas (de clientes)                        | Validada         |
| Tempo de certificação ISO/TS 16949    | As empresas com mais tempo de certificação ISO/TS 16949 possuem FMEA de Processo mais bem aprimorados.  | Maior possibilidade de ter o FMEA de Processo submetido a avaliações externas (de certificadores)                  | Validada         |
| Atuação em projeto (FMEA de Projeto)  | As empresas que também desenvolvem FMEA de Projeto possuem FMEA de Processo mais bem aprimorado.        | O FMEA de Processo não é a única rotina de FMEA da empresa.                                                        | Não validada     |
| Localização                           | As empresas situadas na grande São Paulo possuem FMEA de Processo mais bem aprimorado.                  | Pessoas da equipe de FMEA já tiveram a experiência de trabalhar em FMEAs de outras empresas, na região onde moram. | Não validada     |

Fonte: Dados da Pesquisa

Entre as 25 respostas com valores informados no Quadro 12 e no Quadro 13, 16 informam uma nota de corte para NPR, seja para nível 1 ou nível 2, com valores de 60 a 200. A definição de uma regra específica, baseada na amostragem de dados retornados da pesquisa, foi obtida tendo mediana destes valores, igual a 120, como ponto de partida. Deste modo, pode-se definir as duas regras, sendo uma para a Severidade maior que oito, e outra para a Severidade menor ou igual a oito.

Para a definição da primeira regra, foram considerados os valores de resposta de NPR abaixo da Mediana 120, ou seja: 60, 70, 72, 80, 100 (três vezes) e 112. A partir destes valores foi calculada a média, que resulta em 86,75. Para a segunda regra, foi dada a mesma tratativa para os valores acima da Mediana 120, sendo: 120, 125, 130 (duas vezes), 140, 150, 168 e 200. A partir destes valores foi obtida a média, resultante em 145,37. Considerando valores mais próximos do que pode-se ter como combinação da multiplicação, direcionando para o aspecto mais crítico, define-se a primeira regra com a nota de corte para NPR 80 em situações de Severidade superior a oito, enquanto que a segunda com nota de corte com o valor de NPR 140 para pontuação de Severidade menor ou igual a oito, como apresentado na Tabela 34.

Tabela 34 - Regras para nota de corte a partir da pontuação de Severidade

| Recomendação de ações | Severidade | Nota de corte |
|-----------------------|------------|---------------|
| Regra 1               | $S > 8$    | $NPR > 80$    |
| Regra 2               | $S \leq 8$ | $NPR > 140$   |

Fonte: Dados da Pesquisa

Com o estabelecimento das regras para a recomendação de ações, é possível realizar a aplicação desta métrica no FMEA de inspeção de recebimento em estudo, pela identificação de cada NPR que será submetido à uma ação de melhoria para posterior redução. Assim, a Figura 29 apresenta o FMEA de Processo com a recomendação de ações para os casos de  $NPR > 140$ . A ação recomendada "Receber durante o horário comercial" tem um caráter preventivo, agindo para prevenir a ocorrência da causa "Material recebido após o horário de trabalho" com a redução da pontuação de Ocorrência de sete para dois. Como este é um controle, esta formalização deve ser definida no Plano de Controle do processo, se uma situação de receber fora dos horários estabelecidos ocorre, um plano de reação deve ser iniciado a fim de proporcionar a contenção de eventuais problemas, evitando assim uma falha potencial. Dentro dos sistemas de gestão da qualidade, os planos de reação são documentos formais previamente definidos pela equipe de qualidade e, neste caso, poderia ser detalhado em um procedimento específico para o recebimento de materiais em caráter de emergência.



Figura 29 - Formulário FMEA de Processo atualizado com ações recomendadas e nova pontuação

| Item / Função                            | Modo de Falha Potencial             | Efeito(S) Potencia(S) de Falha        | S E V E . | C L A S . | Causa Potencial ( 6M ) Mecanismos          | O C O R . | Controle de Prevenção Atual                       | Controle de Detecção Atual                     | D E T C . | N P R | Ações Recomen-dadas              | Responsabili-dade pelas ações recomenda-das e prazos envolvidos | Ações Resultantes           |           |           |           |       |
|------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------|-----------|--------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------|-------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-------|
|                                          |                                     |                                       |           |           |                                            |           |                                                   |                                                |           |       |                                  |                                                                 | Ação Tomada                 | S E V E . | O C O R . | D E T C . | N P R |
| Inspeção de recebimento da matéria-prima | Aprovar chapa com comprimento menor | Falta de material na última peça      | 5         |           | Material recebido fora do expediente       | 7         | -                                                 | Auditoria periódica da inspeção de recebimento | 4         | 140   | Recebimento em horário comercial | Antônio 25/04                                                   | Receber das 8:00 às 18:00hs | 5         | 2         | 4         | 40    |
|                                          |                                     |                                       |           |           | Utilização de instrumento inadequado       | 1         | Disponibilizar apenas trena e paquímetro no local | Auditoria periódica da inspeção de recebimento | 4         | 20    |                                  |                                                                 |                             |           |           |           |       |
|                                          | Aprovar chapa com espessura menor   | Produção de peças com espessura menor | 8         |           | Material recebido fora do expediente       | 7         | -                                                 | Auditoria periódica da inspeção de recebimento | 4         | 224   | Recebimento em horário comercial | Antônio 25/04                                                   | Receber das 8:00 às 18:00hs | 8         | 2         | 4         | 64    |
|                                          |                                     |                                       |           |           | Utilização de instrumento inadequado       | 1         | Disponibilizar apenas trena e paquímetro no local | Auditoria periódica da inspeção de recebimento | 4         | 32    |                                  |                                                                 |                             |           |           |           |       |
|                                          | Aprovar chapa empenada              | Impossibilidade de corte laser        | 4         |           | Material recebido fora do expediente       | 7         | -                                                 | Auditoria periódica da inspeção de recebimento | 4         | 112   | Recebimento em horário comercial | Antônio 25/04                                                   | Receber das 8:00 às 18:00hs | 4         | 2         | 4         | 32    |
|                                          | Aprovar material oxidado            | Geração de rebarbas no corte laser    | 4         |           | Recebimento em local de pouca visibilidade | 4         | Iluminação adequada para inspeção visual          | Auditoria periódica da inspeção de recebimento | 4         | 64    |                                  |                                                                 |                             |           |           |           |       |

Fonte: Dados da Pesquisa

Com a definição das regras para nota de corte a partir da pontuação de Severidade, tem-se atingido o terceiro objetivo específico desta tese, que é identificar, por meio de pesquisa com empresas do segmento automotivo, aplicação de regra para a recomendação de ações em FMEA, diminuir dúvidas sobre a necessidade das propostas de melhoria. Adicionalmente, observou-se que, em algumas respostas, casos de reclamação de cliente estão associados com os critérios de recomendação de ações. Uma solução mais adequada para esta situação seria a revisão da pontuação de Ocorrência, pela própria ocorrência do modo de falha, e também uma análise na pontuação de Detecção, uma vez que o modo de falha não foi detectado pelo Controle de Detecção atual. O resultado desta análise irá gerar uma nova pontuação de NPR para ser avaliada dentro das regras 1 e 2. Assim como para os casos de detecção interna de modos de falha pelos controles de detecção atuais, a análise crítica é recomendada a fim de identificar se esta pontuação de Ocorrência está adequada ou não. O resultado desta análise irá gerar uma nova pontuação de NPR a ser analisada dentro das Regras 1 e 2.

É importante notar que a adoção da Severidade como único critério para recomendar ações pode estagnar o processo em termos de melhoria contínua. Em FMEA de Processo, onde na maioria absoluta das oportunidades de redução de pontuação NPR, a pontuação de Severidade não é alterada, a mesma regra deveria sempre passar para a próxima rodada de recomendação de ações, criando uma redundância sem valor agregado. A recomendação, nesses casos, é definir um limite mais baixo de o NPR para Severidades maiores, adaptando-se ao que está estabelecido na Regra 1.

## 6. CONCLUSÃO

### 6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O objetivo da pesquisa de doutorado foi apresentar um modelo conceitual para a aplicação FMEA de Processo reduzindo as variações nas interpretações, pontuações e critérios para as decisões. Para o atendimento do objetivo geral, surgem os objetivos específicos, desenvolvimento de um estudo com a aplicação de FMEA de Processo com base nos conceitos de abordagem por processos; identificação na literatura das tabelas de referência mais apropriadas para a aplicação de FMEA de Processo; e identificação, por meio de pesquisa com empresas do segmento automotivo, aplicação de regra para a recomendação de ações de melhoria em FMEA.

Assim, no Capítulo 2, está apresentada uma fundamentação teórica detalhada sobre o FMEA de Processo, em uma abordagem passo a passo da aplicação do FMEA. Este sequenciamento é cruzado com a estrutura para a construção do FMEA, baseada em três categorias de análise, sendo que as análises classificadas como qualitativas estão relacionadas com fase da construção do modelo estrutural do FMEA; as análises classificadas como quantitativas estão relacionadas com a fase de pontuação e priorização em FMEA; e as análises classificadas como corretivas na fase de decisão e ações de melhoria em FMEA.

Na sequência são desenvolvidos estudos específicos para cada categoria de análise, ou seja estudos relacionados às análises qualitativas, quantitativas e corretivas, nos Capítulos 3, 4 e 5, respectivamente. No Capítulo 3 é realizado um estudo onde são avaliadas situações referentes às análises qualitativas na fase de construção do modelo estrutural do FMEA. Este estudo ocorre na operação de inspeção de recebimento de matéria-prima de uma empresa do segmento automotivo, e apresenta uma revisão de um FMEA tradicional associada aos conceitos de abordagem por processo, tendo como resultado a eliminação de situações de dúvidas que geram irregularidades. Na aplicação convencional foi possível notar que as pontuações são realizadas em um cenário de grande incerteza, resultando na imprecisão dos valores de NPR e na impossibilidade de se destacar os pontos fracos do processo em análise. Por outro lado, com a aplicação dos conceitos de abordagem por processos, devido à definição mais completa dos fatores a serem considerados em cada fase de pontuação, têm-se o processo com os pontos fracos identificados e corrigidos. Desta forma, tem-se atingido o primeiro objetivo específico desta tese, que é desenvolver um estudo com a aplicação de

FMEA de Processo com base nos conceitos de abordagem por processos visando diminuir dúvidas nas definições de causa, falha e efeito.

Um estudo referente às análises quantitativas referentes à fase de pontuação e priorização em FMEA é realizado no Capítulo 4, a partir da identificação de tabelas de referência para a pontuação de Severidade, Ocorrência e Detecção, por meio de levantamento na literatura em publicações sobre FMEA no Capítulo 2, posteriormente comparadas com a aplicação do método AHP, onde são identificadas as propostas mais adequadas no ponto de vista da equipe responsável pelos julgamentos, de acordo com o que inicialmente definido como objetivo para as situações de pontuação. As avaliações foram classificadas como coerentes a partir dos valores obtidos na análise de consistência determinada pelo método.

Desta forma, as melhores alternativas identificadas para as atribuições dos valores dos fatores de risco no FMEA, sendo que para a Severidade, por apresentar um bom nível de detalhamento das informações relacionadas à perda da função, e situações com foco tanto no processo quando na aplicação do produto, a referência apresentada por AIAG (2008), foi identificada como a mais apropriada entre as que foram avaliadas, com valor de prioridade relativa de 0,349. A referência apresentada por Tay e Lim (2006) para atribuição de valores de Ocorrência, é caracterizada pela definição dos níveis baseada na escala de ocorrência dentro de um determinado período de tempo, foi identificada como a referência mais apropriada para a pontuação de Ocorrência, com valor de prioridade relativa de 0,292. Para a atribuição de valores de Detecção, a referência apresentada por Braglia (2000), foi identificada como mais adequada entre as avaliadas, com valor de prioridade relativa de 0,296. Esta tabela de referência apresenta a possibilidade de detecção em diferentes tipos de intervenção no processo, sendo que as associações do nível de atendimento a cada intervenção com a combinação da aplicação dos mesmos formam treze diferentes combinações de pontuação de Detecção. Desta forma, tem-se atingido o segundo objetivo específico desta tese, que é identificar na literatura as tabelas de referência mais apropriadas para a aplicação de FMEA de Processo, visando diminuir dúvidas nas atribuições de valores de Severidade, Ocorrência e Detecção.

No Capítulo 5 é realizado um levantamento em empresas automotivas no estado de São Paulo, onde uma consulta foi realizada a respeito das regras utilizadas para a recomendação de ações em FMEA de Processo, no intuito de se desenvolver um estudo referente às análises corretivas, que ocorrem na fase de decisão sobre ações de melhoria em FMEA. Executando

compilação dos dados da pesquisa, foi possível realizar duas comparações a respeito dos critérios utilizados que, se combinados, podem ser apresentados como a solução mais adequada para a unificação das negociações. A primeira é a comparação entre critérios simples e múltiplos; a outra envolve os critérios com e sem valores definidos.

A adoção de critérios simples ou individuais não estaria em desacordo com a 4ª Edição manual AIAG FMEA, no entanto, este recomenda um critério progressivo, onde para Severidade igual a nove ou dez, a equipe deve trabalhar de forma diferenciada em relação às demais condições. Assim, entende-se que a aplicação de uma solução com múltiplos critérios seria uma melhor alternativa em comparação com os critérios individuais, que foi identificado em 22 das 43 respostas ponderadas. Portanto, a combinação mais adequada para se tomar a decisão sobre a necessidade de recomendação de ações seria um critério múltiplo, com base em duas regras definidas de acordo com a pontuação de Severidade. A primeira regra seria a nota de corte para NPR 80 em situações de Severidade superior a oito, enquanto que a segunda com nota de corte com o valor de NPR 140 para pontuação de Severidade menor ou igual a oito. Desta forma, tem-se atingido o terceiro objetivo específico desta tese, que é identificar, por meio de pesquisa com empresas do segmento automotivo, aplicação de regra para a recomendação de ações em FMEA, diminuir dúvidas sobre a necessidade das propostas de melhoria.

## 6.2 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Mesmo escrito em uma forma similar a um roteiro, a aplicação do FMEA de Processo é uma atividade complexa e, como a maioria das ferramentas de qualidade, antes de ser aplicada, deve ser claramente entendido pela equipe. Uma forma de facilitar esse entendimento está considerando a sequência de eventos na análise falhas para entender suas causas e efeitos, assim como são as sequências de entradas e saídas na definição da abordagem de processo apresentados pela ISO 9001, sendo um dos aspectos a expor a originalidade deste estudo.

O aspecto inédito desta tese envolve a aplicação do FMEA dentro da abordagem de processo, o que pode ser visto como uma ponte na lacuna entre a teoria e a prática, com a possibilidade de ter o conceito aplicado na capacitação dos membros da equipe, tornando possível se extrair mais dos benefícios que o método coloca à disposição dos usuários. A identificação das tabelas de referência mais adequadas para a atribuição dos valores de

Severidade, Ocorrência e Detecção, e o estabelecimento de uma regra coerente para a recomendação de ações de melhoria, apresentam-se como fundamental complemento a este conceito inédito.

Assim, alinhado ao objetivo geral desta tese, têm-se o modelo proposto com maior precisão nas definições de Causa, Falha e Efeito; menor incerteza nas atribuições dos valores de Severidade, Ocorrência e Detecção; e também regras mais claras para a recomendação de ações de melhoria, conforme apresentado no Quadro 15.

Quadro 15 - Modelo conceitual para aplicação de FMEA de Processo

| Tipo de análise                                    | Proposta do modelo                                                                                                                            | Resultados e Evidências                                                           |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Definições da estrutura do FMEA (1º Ciclo)         | Definições com base na abordagem por processos, com mapeamento de entradas e saídas para delimitação de funções                               | Maior precisão nas definições de Causa, Falha e Efeito (Evidência: Figura 17)     |
| Pontuações dos índices para priorização (2º Ciclo) | Tabelas adequadas para pontuação:<br><i>Severidade: AIAG (2008)</i><br><i>Ocorrência: Tay e Lim (2006)</i><br><i>Detecção: Braglia (2000)</i> | Menor incerteza nas pontuações (Evidência: Figura 25)                             |
| Definições de ações de melhoria (3º Ciclo)         | Estabelecimento de regras para necessidades de melhoria:<br><i>Para S=9 ou 10: NPR &gt; 80</i><br><i>Demais valores de S: NPR &gt; 140</i>    | Regras claras para priorizar ações de melhoria no processo (Evidência: Figura 29) |

Fonte: Dados da Pesquisa

### 6.3 PROPOSTAS PARA NOVAS PESQUISAS

Existem algumas frentes de pesquisa que podem ser tidas como uma continuidade deste trabalho. A primeira delas envolve o desenvolvimento de estudos para a medição do impacto de ocorrência de cada irregularidade mapeada na fundamentação teórica sobre FMEA, ou mesmo as identificadas no FMEA onde foi aplicada a pesquisa, e obter uma classificação dentro de uma escala hierárquica. Esta medida poderia priorizar as fragilidades do processo identificadas como a falsa impressão de que o risco da falha é reduzido para valores aceitáveis.

Outra frente de estudos para novas pesquisas pode surgir nas análises quantitativas, que envolvem as atribuições de valores de Severidade, Ocorrência e Detecção. Neste grupo de análises, existem basicamente duas frentes de atuação, uma envolvendo técnicas adicionais para a pontuação, como MDCM, e outra, com o foco dado neste trabalho, que é o emprego de

tabelas de referência para pontuação. Sugere-se então uma convergência entre estas duas frentes, que é o emprego de MCDM não para a atribuição dos valores de pontuação, mas para o desenvolvimento de tabelas de referência específicas para determinada empresa, processo ou cenário de aplicação, levando em suas particularidades e restrições.

Outras propostas para o desdobramento do modelo proposto em processos chave de um sistema de gestão da qualidade, não apenas em processos produtivos ou do ambiente de manufatura. Tal proposta poderia ainda abranger os novos aspectos da gestão de riscos abordada na nova versão da norma ISO 9001. Referente às métricas para recomendação de ações de melhoria, a pesquisa com empresas do estado de São Paulo pode ser expandida para empresas de outras regiões, ou ainda segmentada em grupos específicos, como por ramo de atuação ou mesmo pelo nível na cadeia automotiva.

### Referências Bibliográficas

- ABBASGHOLIZADEH RAHIMI, S. et al. Using Fuzzy Cost-Based FMEA, GRA and Profitability Theory for Minimizing Failures at a Healthcare Diagnosis Service. **Quality and Reliability Engineering International**, p. n/a–n/a, 27 dez. 2013.
- AGUIAR, D. C. DE; SALOMON, V. A. P. Avaliação da prevenção de falhas em processos utilizando métodos de tomada de decisão. **Produção**, v. 17, n. 3, p. 502–519, 2007.
- AGUIAR, D. C. DE; SALOMON, V. A. P. **Recommending actions criteria in FMEA: A Survey in Brazilian Automotive Companies**. International Conference on Quality Engineering and Management. **Anais...**Guimarães - Portugal: 2014
- AGUIAR, D. C. DE; SALOMON, V. A. P.; MELLO, C. H. P. An ISO 9001 based approach for the implementation of process FMEA in the Brazilian automotive industry. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 32, n. 6, p. 589–602, 18 maio 2015.
- AGUIAR, D. C. DE; SOUZA, H. J. C. DE; SALOMON, V. A. P. AN AHP APPLICATION TO EVALUATE SCORING CRITERIA FOR FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA). **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**, v. 2, n. 1, 2010.
- AHSEN, A. VON. Cost-oriented failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 25, n. 5, p. 466–476, 2008.
- ALIC, M.; RUSJAN, B. Contribution of the ISO 9001 internal audit to business performance. **The International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 27, p. 916–937, 2010.
- AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG). **Potential Failure Mode and Effects Analysis**. Southfield, MI, 2008.
- 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.
- BARENDT, D. M. et al. Risk analysis of analytical validations by probabilistic modification of FMEA. **Journal of pharmaceutical and biomedical analysis**, v. 64–65, p. 82–6, maio 2012.
- BEN-DAYA, M.; RAOUF, A. A revised failure mode and effects analysis model. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 13, n. 1, p. 43–47, 1996.
- BOZDAG, E. et al. Risk prioritization in Failure Mode and Effects Analysis using interval type-2 fuzzy sets. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 8, p. 4000–4015, 2015.
- BRADLEY, J. R.; GUERRERO, H. H. An Alternative FMEA Method for Simple and Accurate Ranking of Failure Modes. **Decision Sciences**, v. 42, n. 3, p. 743–771, 28 ago. 2011.
- BRAGLIA, M. MAFMA: multi-attribute failure mode analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 17, n. 9, p. 1017–1033, 2000.
- BRAGLIA, M.; FANTONI, G.; FROSOLINI, M. The house of reliability. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 24, n. 4, p. 420–440, 2007.
- CARMIGNANI, G. An integrated structural framework to cost-based FMECA: The



priority-cost FMECA. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 94, p. 861–871, 2009.

CASSANELLI, G. et al. Failure Analysis-assisted FMEA. **Microelectronics Reliability**, v. 46, n. 9-11, p. 1795–1799, set. 2006.

CHANG, C.-L.; LIU, P.-H.; WEI, C.-C. Failure mode and effects analysis using grey theory. **Integrated Manufacturing Systems**, v. 12, n. 3, p. 211–216, 2001.

CHANG, D.-S.; SUN, K.-L. P. Applying DEA to enhance assessment capability of FMEA. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 26, n. 6, p. 629–643, 2009.

CHANG, K.-H. Evaluate the orderings of risk for failure problems using a more general RPN methodology. **Microelectronics Reliability**, v. 49, n. 12, p. 1586–1596, 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, jul. 2013.

CHANG, K.-H.; CHENG, C. H. Evaluating the risk of failure using the fuzzy OWA and DEMATEL method. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 22, p. 113–129, 2011.

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

CHANG, K.-H.; WEN, T. C. A novel efficient approach for DFMEA combining 2-tuple and the OWA operator. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 3, p. 2362–2370, 2010.

CHENG, E. W. L.; LI, H.; HO, D. C. K. Analytic hierarchy process (AHP) A defective tool when used improperly. **Measuring Business Excellence**, v. 6, n. 4, p. 33–37, 2002.

CHIN, K.-S. et al. Failure mode and effects analysis by data envelopment analysis. **Decision Support Systems**, v. 48, n. 1, p. 246–256, 2009a.

CHIN, K.-S. et al. Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach. **Computers & Operations Research**, v. 36, p. 1768–1779, 2009b.

COSTA NETO, P. L. DE O. Estatística, Edgard Blucher. **São Paulo**, 2002.

DONG, C. Failure mode and effects analysis based on fuzzy utility cost estimation. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 24, n. 9, p. 958–971, 2007.

DROR, S. House of Reliability Costs: Developing Reliability Program Activities. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 30, n. 3, p. 375–380, 10 abr. 2014.

DU, Y. et al. New Failure Mode and Effects Analysis: An Evidential Downscaling Method. **Quality and Reliability Engineering International**, p. n/a–n/a, 7 nov. 2014.

ESTORILIO, C.; POSSO, R. K. The reduction of irregularities in the use of “process FMEA”. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 27, n. 6, p. 721–733, 2010.

FEILI, H. R. et al. Risk analysis of geothermal power plants using Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) technique. **Energy Conversion and Management**, v. 72, p. 69–76, 2013.

FERNANDES, J. M. R.; REBELATO, M. G. Proposta de um Método para Integração entre QFD e FMEA. **Gestão & Produção**, v. 13, n. 2, p. 245 – 259, 2006.

FORZA, C. Survey research in operations management: a process-based perspective.

**International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 152–194, 2002.

GAMBI, L. D. N.; GEROLAMO, M. C.; CARPINETTI, L. C. R. A Theoretical Model of the Relationship between Organizational Culture and Quality Management Techniques. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 81, p. 334–339, 2013.

GARCIA, P. A A; SCHIRRU, R.; MELO, P. F. A fuzzy data envelopment analysis approach for FMEA. **Progress in Nuclear Energy**, v. 46, n. 3, p. 359–373, 2005.

HADI-VENCHEH, A.; AGHAJANI, M. Failure mode and effects analysis A fuzzy group MCDM approach. **Journal of Soft Computing and Applications**, v. 2013, p. 1–14, 2013.

HAEFNER, B. et al. Quality value stream mapping. **Procedia CIRP**, v. 17, p. 254–259, 2014.

HO, W.; DEY, P. K.; HIGSON, H. E. Multiple criteria decision-making techniques in higher education. **International journal of educational management**, v. 20, n. 5, p. 319–337, 2006.

HU, A. H. et al. Risk evaluation of green components to hazardous substance using FMEA and FAHP. **Expert Systems with Applications**, v. 36, n. 3, p. 7142–7147, 2009.

KARTHA, C. P. A comparison of ISO 9000:2000 quality system standards, QS9000, ISO/TS 16949 and Baldrige criteria. **The TQM Magazine**, v. 16, p. 331–340, 2004.

KESKIN, G. A.; ÖZKAN, C. An Alternative Evaluation of FMEA: Fuzzy ART Algorithm. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 25, n. November 2008, p. 647–661, 2009.

KMENTA, S.; ISHII, K. **Scenario-Based FMEA: A life cycle cost perspective**. ASME Design engineering technical Conferences. **Anais...**Baltimore, Maryland: 2000

KOLICH, M. Using Failure Mode and Effects Analysis to design a comfortable automotive driver seat. **Applied Ergonomics**, v. 45, n. 4, p. 1087–1096, 2014.

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

LAZARTE, M. **ISO 9001 revision moves on to final stage**. Disponível em: <[http://www.iso.org/iso/home/news\\_index/news\\_archive/news.htm?refid=Ref1905](http://www.iso.org/iso/home/news_index/news_archive/news.htm?refid=Ref1905)>. Acesso em: 7 set. 2015.

LEE, B. H. **Using Bayes belief networks in industrial FMEA modeling and analysis**. Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2001 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity (Cat. No.01CH37179). **Anais...Ieee**, 2001Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=902434>>

LILLIE, E.; SANDBORN, P.; HUMPHREY, D. Assessing the value of a lead-free solder control plan using cost-based FMEA. **Microelectronics Reliability**, v. 55, n. 6, p. 969–979, 2015.

LIU, H.-C. et al. 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. et al. Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 17, p. 12926–12934, 2012.

LIU, H.-C. et al. Failure mode and effects analysis using D numbers and grey relational projection method. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 10, p. 4670–4679, 2014a.

LIU, H.-C. et al. A Novel Approach for FMEA: Combination of Interval 2-Tuple Linguistic Variables and Gray Relational Analysis. **Quality and Reliability Engineering International**, p. n/a–n/a, 7 mar. 2014b.

LIU, H.-C. et al. Improving risk evaluation in FMEA with a hybrid multiple criteria decision making method. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 32, n. 7, p. 763–782, 2015.

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

LOLLI, F. et al. FlowSort-GDSS – A novel group multi-criteria decision support system for sorting problems with application to FMEA. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 17-18, p. 6342–6349, 2015.

MANDAL, S.; MAITI, J. Risk analysis using FMEA: Fuzzy similarity value and possibility theory based approach. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 7, p. 3527–3537, 2014.

MARIAJAYAPRAKASH, A.; SENTHILVELAN, T. Failure detection and optimization of sugar mill boiler using FMEA and Taguchi method. **Engineering Failure Analysis**, v. 30, p. 17–26, jun. 2013.

MARRIOTT, B. et al. An integrated methodology to prioritise improvement initiatives in low volume-high integrity product manufacturing organisations. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 24, n. 2, p. 197–217, fev. 2013.

MARTINS, R. A. Abordagens quantitativa e qualitativa. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier. Cap. v. 3, p. 45–61, 2012.

MERAJ, R.; FARHAD, S. N. Prediction of subsidence risk by FMEA using artificial neural network and fuzzy inference system. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 25, n. 4, p. 655–663, 2015.

MIGUEL, P. A. C.; HO, L. L. Levantamento tipo Survey. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, p. 73–128, 2010.

MURPHY, M.; HEANEY, G.; PERERA, S. A methodology for evaluating construction innovation constraints through project stakeholder competencies and FMEA. **Construction Innovation: Information, Process, Management**, v. 11, p. 416–440, 2011.

NAKANO, D. Métodos de Pesquisa adotados na Engenharia de Produção e Gestão de Operações. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**, 2012.

NETTO, T. A.; HONORATO, H. J.; QASSIM, R. Y. Prioritization of failure risk in subsea flexible pipes via data envelopment analysis. **Marine Structures**, v. 34, p. 105–116, 2013.

OOKALKAR, A. D.; JOSHI, A. G.; OOKALKAR, D. S. Quality improvement in

haemodialysis process using FMEA. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 26, n. 8, p. 817–830, 2009.

PACIAROTTI, C. et al. A revised FMEA application to the quality control management. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 31, n. 7, p. 788–810, 29 jul. 2014.

PALADY, P. **FMEA: Análise dos Modos de Falha e Efeito**. São Paulo: IMAN, 1997.

PETROVIĆ, D. V. et al. Risk assessment model of mining equipment failure based on fuzzy logic. **Expert Systems with Applications**, v. 41, p. 8157–8164, 2014.

PINTO, S. H. B.; CARVALHO, M. M. DE; HO, L. L. Main quality programs characteristics in large size Brazilian companies. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 25, p. 276–291, 2008.

PUENTE, J. et al. A decision support system for applying failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 19, n. 2, p. 137–150, 2002.

REID, R. D. FMEA-Something Old , Something New. **Quality Progress**, v. 38, n. 5, p. 90 – 93, 2005.

RHEE, S. J.; ISHII, K. Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability. **Advanced Engineering Informatics**, v. 17, n. 3-4, p. 179–188, jul. 2003.

ROWLEY, J.; SLACK, F. Conducting a literature review. **Management Research News**, v. 27, n. 6, p. 31–39, 2004.

SAATY, T. L. **Analytic Hierarchy Process: Decision Making for Leaders**. [s.l.] RWS Publications, 2001.

SAE. **ARP 5580: Recommended Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) Practices for Non-Automobile**. SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2001.

SALOMON, V. A. P. **Desempenho da Modelagem do Auxílio à Decisão por Múltiplos Critérios na Análise do Planejamento e Controle da Produção**. [s.l.] Poli/USP, 2004.

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**, v. 18, n. 3, p. 324–336, 2001.

SANT'ANNA, A. P. Probabilistic priority numbers for failure modes and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 29, n. 3, p. 349–362, 2012.

SANT'ANNA, A. P.; MEZA, L. A.; RIBEIRO, R. O. A. Probabilistic composition in quality management in the retail trade sector. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 31, n. 6, p. 718–736, 27 maio 2014.

SAWHNEY, R. et al. A modified FMEA approach to enhance reliability of lean systems. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 27, n. 7, p. 832–855, 2010.

SEGISMUNDO, A.; MIGUEL, P. A. C. Failure mode and effects analysis (FMEA) in the context of risk management in new product development: A case study in an automotive company. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 25, n. 9, p. 899–912, 2008.

SEYED-HOSSEINI, S. M.; SAFAEI, N.; ASGHARPOUR, M. J. Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial and evaluation laboratory technique. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 91, p. 872–881, 2006.

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

SHARMA, R. K.; KUMAR, D.; KUMAR, P. Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 22, n. 9, p. 986–1004, 2005.

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**, v. 24, n. 5, p. 525–546, 2007.

SHARMA, V.; KUMARI, M.; KUMAR, S. Reliability improvement of modern aircraft engine through failure modes and effects analysis of rotor support system. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 28, p. 675–687, 2011.

SHIMIZU, T. **Decisão nas Organizações: introdução aos problemas de decisão encontrados nas organizações e nos sistemas de apoio à decisão**. Segunda Ed ed. São Paulo: Atlas, 2006.

SILVESTRI, A.; DE FELICE, F.; PETRILLO, A. Multi-criteria risk analysis to improve safety in manufacturing systems. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 17, p. 4806–4821, set. 2012.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. Segunda Ed ed. São Paulo: Atlas, 2007.

SONG, W. et al. A rough TOPSIS Approach for Failure Mode and Effects Analysis in Uncertain Environments. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 30, n. 4, p. 473–486, 7 jun. 2014.

STAMATIS, D. H. **Failure Mode and Effect Analysis, FMEA from Theory to Execution**. ASQ Quality Press Publications. **Anais...**Milwaukee, WI: 1995

TANIK, M. methodologies : a case study Improving “ order handling ” process by using QFD and FMEA methodologies : a case study. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 27, n. 4, p. 404 – 423, 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**, v. 23, n. 8, p. 1047–1066, 2006.

TENG, S. G. et al. Implementing FMEA in a collaborative supply chain environment. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 23, n. 2, p. 179–196, 2006.

TERNINKO, J. **Reliability/mistake-proofing using Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)**. ASQ’s Annual Quality Congress Proceedings. **Anais...**2003

TOZZI, A. R. **Desenvolvimento de um programa de verificação de im processo de lançamento de cabos com o auxílio da FMEA**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. Pesquisa-ação na engenharia de produção. In: **Metodologia de Pesquisa em engenharia de produção e gestões de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. p. 149–166.

VAHDANI, B.; SALIMI, M.; CHARKHCHIAN, M. A new FMEA method by integrating fuzzy belief structure and TOPSIS to improve risk evaluation process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, p. 357–368, 2014.

VAIDYA, O. S.; KUMAR, S. Analytic hierarchy process: An overview of applications. **European Journal of operational research**, v. 169, n. 1, p. 1–29, 2006.

VINODH, S.; SANTHOSH, D. Application of FMEA to an automotive leaf spring manufacturing organization. **The TQM Journal**, v. 24, p. 260–274, 2012.

WAHID, R. A.; CORNER, J.; PECK-LEONG, T. ISO 9000 maintenance in service organisations: tales from two companies. **The International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 28, n. 7, p. 735–757, 2011.

WANG, Y.-M. et al. Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. **Expert Systems with Applications**, v. 36, n. 2, p. 1195–1207, 2009.

XIAO, N. et al. Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA. **Engineering Failure Analysis**, v. 18, n. 4, p. 1162–1170, jun. 2011.

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

YANG, C.-C. et al. A study on applying FMEA to improving ERP introduction: An example of semiconductor related industries in Taiwan. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 23, n. 3, p. 298–322, 2006.

YANG, Z.; BONSALL, S.; WANG, J. Fuzzy Rule-Based Bayesian Reasoning Approach for Prioritization of Failures in FMEA. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 57, n. 3, p. 517–528, set. 2008.

ZAMMORI, F.; GABBRIELLI, R. ANP/RPN: a multi criteria evaluation of the Risk Priority Number. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 28, n. 1, p. 85–104, 2012a.

ZAMMORI, F.; GABBRIELLI, R. ANP/RPN: a multi criteria evaluation of the Risk Priority Number. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 28, n. 1, p. 85–104, 22 fev. 2012b.

ZHANG, Z.; CHU, X. Risk prioritization in failure mode and effects analysis under uncertainty. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 1, p. 206–214, 2011.

**APÊNDICE A - Quadro evolutivo das publicações relacionadas a FMEA nos últimos 15 anos**

| Ano  | Descrição                                                                                                                                                                            | Referência Bibliográfica                   |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 2000 | Introdução da análise do modo de falha multi-atributo (MAFMA), que usa o Processo de Análise Hierárquica (AHP) para calcular os pesos para os fatores de risco                       | (BRAGLIA, 2000)                            |
|      | Desenvolvimento do FMEA associado a uma ferramenta de tomada de decisão baseada em custo                                                                                             | (KMENTA; ISHII, 2000)                      |
| 2001 | Estudo que aplica a Teoria Grey em FMEA para melhorar a confiabilidade do produto e estabilidade do processo                                                                         | (CHANG; LIU; WEI, 2001)                    |
|      | Método para a realização do cálculo do NPR através de uma gestão dados em escalas qualitativas sem necessidade de uma conversão numérica arbitrária e artificial                     | (FRANCESCHINI; GALETTO, 2001)              |
|      | Modelos de FMEA em um sistema mecatrônico com o uso de redes de probabilidade Bayesianas                                                                                             | (LEE, 2001)                                |
|      | Abordagem modificada para a priorização de modos de falha em FMEA chamado grau de prioridade de risco                                                                                | (SANKAR; PRABHU, 2001)                     |
| 2002 | Abordagem Fuzzy-FMEA para superar a dificuldade potencial na divisão de informações entre especialistas de várias disciplinas                                                        | (XU <i>et al.</i> , 2002)                  |
|      | Sistema que utiliza a simulação para selecionar as combinações mais prováveis de falhas para uma investigação automatizada                                                           | (PRICE; TAYLOR, 2002)                      |
|      | Metodologia baseada em um sistema de decisão apoiada por regras qualitativas que fornece um ranking dos riscos de potenciais causas de falhas no sistema de produção                 | (PUENTE <i>et al.</i> , 2002)              |
| 2003 | Método onde a função de risco deve ser associada aos valores normalizados de NPR                                                                                                     | (BRAGLIA; FROSOLINI; MONTANARI, 2003a)     |
|      | Abordagem alternativa multi atributo de tomada de decisão chamada Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade à Solução Ideal (TOPSIS) associada ao Fuzzy-FMEA                | (BRAGLIA; FROSOLINI; MONTANARI, 2003b)     |
|      | Nova abordagem integrando FMEA, regras Fuzzy e teoria Grey, com o propósito de superar inconvenientes de um FMEA tradicional                                                         | (PILLAY; WANG, 2003)                       |
|      | Estudo de custos relacionado ao FMEA, com a utilização da Simulação de Monte Carlo para executar análise de sensibilidade sobre as variáveis que impactam os custos do ciclo de vida | (RHEE; ISHII, 2003)                        |
| 2004 | Nova abordagem para melhorar as capacidades de FMEA através de sua integração com o modelo Kano                                                                                      | (SHAHIN, 2004)                             |
| 2005 | Proposta com análise envoltória de dados (DEA) para otimização dos pesos a fim de medir os riscos máximos de cada modo de falha                                                      | (GARCIA; SCHIRRU; MELO, 2005)              |
| 2006 | Método chamado de Laboratório de Avaliação e Julgamento para Tomada de Decisão (DEMATEL) para redefinição de prioridades de modos de falha em FMEA                                   | (SEYED-HOSSEINI; SAFAEI; ASGHARPOUR, 2006) |

| Ano  | Descrição                                                                                                                                                                     | Referência Bibliográfica            |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
|      | Método para simplificar a integração entre FMEA Lógica <i>Fuzzy</i> , reduzindo o número de regras na obtenção do NPR                                                         | (TAY; LIM, 2006a)                   |
|      | Análise dos problemas na implementação do FMEA integrada em termos de inconsistência de pontuação                                                                             | (TENG <i>et al.</i> , 2006)         |
| 2007 | Método FMEA para transformar requisitos dos clientes em requisitos funcionais do produto de uma maneira estruturada.                                                          | (BRAGLIA; FANTONI; FROSOLINI, 2007) |
|      | Modelo Estrutural Interpretativo (ISM) e Processo Analítico Network (ANP) para priorizar modos de falha e ação corretiva                                                      | (CHEN, 2007)                        |
|      | Teoria da utilidade baseada em funções de pertinência <i>Fuzzy</i> para avaliar NPR por custos de falhas                                                                      | (DONG, 2007)                        |
|      | Análise do comportamento da falha do sistema através da adoção de três ferramentas: Análise de Causa Raiz (RCA), FMEA, e Processo de Poisson Não-Homogêneo (NHPP)             | (SHARMA; KUMAR; KUMAR, 2007)        |
| 2008 | Gestão de riscos técnicos para sistematizar o processo de tomada de decisão no desenvolvimento de novos produtos através da utilização de FMEA                                | (SEGISMUNDO; MIGUEL, 2008)          |
|      | Implementação do FMEA desdobrando os efeitos potenciais em função dos custos envolvidos.                                                                                      | (AHSEN, 2008)                       |
|      | Abordagem Bayesiana (FuRbAR) baseada em regras <i>Fuzzy</i> para priorizar falhas em FMEA                                                                                     | (YANG; BONSALE; WANG, 2008)         |
| 2009 | Aplicação do Modo de falha multi atributo (MAFMA) com o Processo de Análise Hierárquica (AHP) para calcular os pesos para os fatores de risco                                 | (CARMIGNANI, 2009)                  |
|      | Metodologia mais genérica para NPR, que combina a média geométrica e o julgamento e avaliação laboratorial de tomada de decisão                                               | (CHANG, 2009)                       |
|      | Aplicação da técnica de Análise Envolvente de Dados (DEA) para melhorar as capacidades de avaliação de FMEA                                                                   | (CHANG; SUN, 2009)                  |
|      | Metodologia que incorpora FMEA em QFD usando média geométrica ponderada, na avaliação dos riscos do projeto relacionados à satisfação do cliente                              | (CHEN; KO, 2009)                    |
|      | Abordagem integrada entre FMEA e a Análise Envolvente de Dados (DEA) para determinação de NPR                                                                                 | (CHIN <i>et al.</i> , 2009)         |
|      | Aplicação do FMEA relacionada com Processo de Análise Hierárquica (AHP) e Lógica <i>Fuzzy</i> para estudar os riscos em aspectos ambientais                                   | (HU <i>et al.</i> , 2009)           |
|      | Avaliação dos fatores de risco utilizando termos linguísticos difusos, propondo o uso de média geométrica com pesos <i>Fuzzy</i> para a priorização de modos de falha em FMEA | (WANG <i>et al.</i> , 2009)         |
| 2010 | Proposta que combina uma técnica de representação linguística de intervalos (2-Tuple) e Média Ponderada Ordenada (OWA) para priorização de falhas em um FMEA de Produto.      | (CHANG; WEN, 2010)                  |
|      | Integração dos princípios Lean com FMEA para entender e melhorar a confiabilidade dos sistemas Lean.                                                                          | (SAWHNEY <i>et al.</i> , 2010)      |



| Ano  | Descrição                                                                                                                                                                                                    | Referência Bibliográfica             |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
|      | Aplicação de ferramentas de melhoria da qualidade como QFD e FMEA na cadeia de abastecimento na produção de alimentos                                                                                        | (TANIK, 2010)                        |
| 2011 | Proposta de um algoritmo simplificado com base em Média Ponderada Ordenada (OWA) e Avaliação e Julgamento para Tomada de Decisão (DEMATEL) para classificar o risco de falhas                                | (CHANG; CHENG, 2011)                 |
|      | Estudo experimental de um método de classificação de NPR usando uma técnica de elicitación de dados.                                                                                                         | (BRADLEY; GUERRERO, 2011)            |
|      | Método com Lógica Fuzzy integrada à Teoria Grey para priorizar modos de falha em FMEA sob diferentes tipos de incertezas                                                                                     | (LIU <i>et al.</i> , 2011)           |
|      | Proposta do método Fuzzy como uma solução eficaz para o cálculo do NPR sob incerteza                                                                                                                         | (ZHANG; CHU, 2011)                   |
| 2012 | Modificação probabilística em FMEA, a fim de ter uma estimativa quantitativa da Ocorrência e Detecção do modo de falha                                                                                       | (BARENDTS <i>et al.</i> , 2012)      |
|      | Estudo de caso onde o FMEA é aplicado associado a outras técnicas como Processo de Análise Hierárquica (AHP), Lógica Fuzzy e Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade à Solução Ideal (TOPSIS)     | (KUTLU; EKMEKÇIOĞLU, 2012)           |
|      | Modelo de FMEA com base na associação de conjuntos Fuzzy e método Vikor para priorização dos modos de falha                                                                                                  | (LIU <i>et al.</i> , 2012)           |
|      | Versão avançada do FMEA, em que a avaliação leva em conta possíveis interações entre as principais causas potenciais, com a utilização de Processo Analítico Network (ANP)                                   | (ZAMMORI; GABBRIELLI, 2012)          |
| 2013 | Aplicação de Fuzzy FMEA com a Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade à Solução Ideal (TOPSIS)                                                                                                    | (HADI-VENCHEH; AGHAJANI, 2013)       |
|      | Estudo sobre a tendência de incorporar métodos MCDM com lógica Fuzzy em FMEA                                                                                                                                 | (LIU; LIU; LIU, 2013)                |
|      | Proposta de um modelo matemático com base em Análise Envoltória de Dados (DEA) para FMEA                                                                                                                     | (NETTO; HONORATO; QASSIM, 2013)      |
| 2014 | Proposta de um novo modelo de prioridade de risco para a avaliação do risco de FMEA com base nos números D e no método de Projeção Relacional Grey (GRP)                                                     | (LIU <i>et al.</i> , 2014a)          |
|      | Abordagem de FMEA que envolve o raciocínio probatório para expressar a avaliação de diferentes especialistas.                                                                                                | (DU <i>et al.</i> , 2014)            |
|      | Metodologia de avaliação de risco utilizando um modelo de representação linguística de intervalos (2-Tuple) para avaliar o risco de modos de falha em FMEA.                                                  | (LIU <i>et al.</i> , 2014b)          |
|      | Metodologia em FMEA que integra os conceitos de valor semelhança medida de números difusos e teoria possibilidade                                                                                            | (MANDAL; MAITI, 2014)                |
|      | Aplicação da Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade à Solução Ideal (TOPSIS) em uma abordagem para FMEA para identificar a prioridade risco de modos de falha em ambientes subjetivos e incertos | (SONG <i>et al.</i> , 2014)          |
|      | Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade à Solução Ideal (TOPSIS) combinada com FMEA para descrever o                                                                                              | (VAHDANI; SALIMI; CHARKHCHIAN, 2014) |

| Ano  | Descrição                                                                                                                                                                                                                                                   | Referência Bibliográfica   |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
|      | conhecimento especializado                                                                                                                                                                                                                                  |                            |
| 2015 | Método híbrido de tomada de decisão com múltiplos critérios, combinando Método VIKOR, Avaliação e Julgamento para Tomada de Decisão (DEMATEL) e Processo de Análise Hierárquica (AHP), para classificar o risco de os modos de falha identificados nos FMEA | (LIU <i>et al.</i> , 2015) |
|      | Abordagem <i>Fuzzy</i> FMEA baseado em conjuntos <i>Fuzzy</i> IT2, preservando as variações entre os julgamentos individuais                                                                                                                                | (BOZDAG, 2015)             |
|      | Nova abordagem para analisar a priorização do risco e agrupamento de modos de falha em FMEA                                                                                                                                                                 | (TAY; JONG; LIM, 2015)     |

**APÊNDICE B - Relação de Publicações científicas que abordam a integração de FMEA com outras técnicas.**

| <b>Categoria</b>       | <b>Abordagem</b>    | <b>Autores / Ano</b>                       | <b>Periódico</b>                                           |
|------------------------|---------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| MCDM                   | Teoria Grey         | (CHANG; WEI; LEE, 1999)                    | Kybernetes                                                 |
|                        | AHP/ANP             | (BRAGLIA, 2000)                            | International Journal of Quality & Reliability Management. |
|                        | Teoria Grey         | (CHANG; LIU; WEI, 2001)                    | Integrated Manufacturing Systems                           |
|                        | Teoria Grey         | (PILLAY; WANG, 2003)                       | International Journal of Quality & Reliability Management  |
|                        | DEMATEL             | (SEYED-HOSSEINI; SAFAEI; ASGHARPOUR, 2006) | Reliability Engineering & System Safety                    |
|                        | Teoria Grey         | (SHARMA; KUMAR; KUMAR, 2007d)              | Quality and Reliability Engineering International          |
|                        | Teoria Grey         | (SHARMA; KUMAR; KUMAR, 2008b)              | International Journal of Systems Science                   |
|                        | Teoria da Evidência | (CHIN <i>et al.</i> , 2009a)               | Computers & Operations Research                            |
|                        | AHP/ANP             | (CARMIGNANI, 2009)                         | Reliability Engineering and System Safety                  |
|                        | AHP/ANP             | (HU <i>et al.</i> , 2009)                  | Expert Systems with Applications                           |
|                        | Teoria da Evidência | (YANG <i>et al.</i> , 2011)                | Engineering Failure Analysis                               |
|                        | Teoria Grey         | (GEUM; CHO; PARK, 2011)                    | Mathematical and Computer Modelling                        |
|                        | VIKOR               | (LIU <i>et al.</i> , 2012)                 | Expert Systems with Applications                           |
|                        | AHP/ANP             | (ZAMMORI; GABBRIELLI, 2012)                | Quality and Reliability Engineering International          |
| Programação Matemática | DEA /Fuzzy DEA      | (GARCIA; SCHIRRU; MELO, 2005)              | Progress in Nuclear Energy                                 |
|                        | Programação Linear  | (WANG <i>et al.</i> , 2009)                | Expert Systems with Applications                           |
|                        | DEA /Fuzzy DEA      | (CHANG; SUN, 2009)                         | International Journal of Quality & Reliability Management  |
|                        | DEA /Fuzzy DEA      | (CHIN <i>et al.</i> , 2009b)               | Decision Support Systems                                   |
|                        | Programação Linear  | (CHEN; KO, 2009a)                          | Fuzzy sets and systems                                     |
|                        | Programação Linear  | (CHEN; KO, 2009b)                          | Applied Mathematical Modelling                             |
|                        | Programação Linear  | (GARGAMA; CHATURVEDI, 2011)                | IEEE Transactions on Reliability                           |

| <b>Categoria</b>        | <b>Abordagem</b>                      | <b>Autores / Ano</b>                   | <b>Periódico</b>                                                                   |
|-------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|                         | DEA                                   | (NETTO; HONORATO; QASSIM, 2013)        | Marine Structures                                                                  |
| Inteligência Artificial | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (CHANG; CHENG, 2010)                   | International Journal of Systems Science                                           |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (BOWLES; PELÁEZ, 1995)                 | Reliability Engineering & System Safety                                            |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (SANKAR; PRABHU, 2001)                 | International Journal of Quality & Reliability Management                          |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (XU <i>et al.</i> , 2002)              | Reliability Engineering & System Safety                                            |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (PUENTE <i>et al.</i> , 2002)          | International Journal of Quality & Reliability Management                          |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (PILLAY; WANG, 2003)                   | International Journal of Quality & Reliability Management                          |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (BRAGLIA; FROSOLINI; MONTANARI, 2003a) | International Journal of Quality & Reliability Management                          |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (SHARMA; KUMAR; KUMAR, 2005)           | International Journal of Quality & Reliability Management                          |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (TAY; LIM, 2006a)                      | International Journal of Quality & Reliability Management                          |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (SHARMA; KUMAR; KUMAR, 2007c)          | International Journal of Quality & Reliability Management                          |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (SHARMA; KUMAR; KUMAR, 2007a)          | International Journal of Quality & Reliability Management                          |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (SHARMA; KUMAR; KUMAR, 2007b)          | International Journal of Industrial and Systems Engineering                        |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (SHARMA; KUMAR; KUMAR, 2007d)          | Quality and Reliability Engineering International                                  |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (YANG; BONSALE; WANG, 2008)            | IEEE Transactions on Reliability                                                   |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (NEPAL <i>et al.</i> , 2008)           | Quality and Reliability Engineering International                                  |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (SHARMA; KUMAR; KUMAR, 2008a)          | International Journal of Product Development                                       |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (SHARMA; KUMAR; KUMAR, 2008b)          | International Journal of Systems Science                                           |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (SHARMA; KUMAR; KUMAR, 2008c)          | Applied Soft Computing                                                             |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (KESKIN; ÖZKAN, 2009)                  | Quality and Reliability Engineering International                                  |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (TAY; LIM, 2010)                       | Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (SHARMA; SHARMA, 2010)                 | Journal of Quality in Maintenance Engineering                                      |

| <b>Categoria</b>        | <b>Abordagem</b>                          | <b>Autores / Ano</b>                   | <b>Periódico</b>                                               |
|-------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Inteligência Artificial | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i>     | (GARGAMA; CHATURVEDI, 2011)            | IEEE Transactions on Reliability                               |
|                         | Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i>     | (MANDAL; MAITI, 2014)                  | Expert Systems with Applications                               |
| Abordagens integradas   | <i>Fuzzy</i> TOPSIS                       | (BRAGLIA; FROSOLINI; MONTANARI, 2003b) | Quality and Reliability Engineering International              |
|                         | <i>Fuzzy</i> TOPSIS                       | (HADI-VENCHEH; AGHAJANI, 2013)         | Journal of Soft Computing and Applications                     |
|                         | <i>Fuzzy</i> TOPSIS                       | (SONG <i>et al.</i> , 2014)            | Quality and Reliability Engineering International              |
|                         | <i>Fuzzy</i> TOPSIS                       | (VAHDANI; SALIMI; CHARKHCHIAN, 2014)   | The International Journal of Advanced Manufacturing Technology |
|                         | ISM-ANP-UPN                               | (CHEN, 2007)                           | Journal of Failure Analysis and Prevention                     |
|                         | OWGA-DEMATEL                              | (CHANG, 2009)                          | Microelectronics Reliability                                   |
|                         | 2-tuple-OWA                               | (CHANG; WEN, 2010)                     | Expert Systems with Applications                               |
|                         | AHP-Sistema a base de regras <i>Fuzzy</i> | (ABDELGAWAD; FAYEK, 2010)              | Journal of Construction Engineering and Management             |
|                         | IFS-DEMATEL                               | (CHANG; CHENG, 2010)                   | International Journal of Systems Science                       |
|                         | WLSM-MOI-Partial ranking method           | (ZHANG; CHU, 2011)                     | Expert Systems with Applications                               |
|                         | <i>Fuzzy</i> OWA - DEMATEL                | (CHANG; CHENG, 2011)                   | Journal of Intelligent Manufacturing                           |
|                         | <i>Fuzzy</i> -Teoria Grey                 | (LIU <i>et al.</i> , 2011)             | Expert Systems with Applications                               |
|                         | <i>Fuzzy</i> AHP- <i>Fuzzy</i> TOPSIS     | (KUTLU; EKMEKÇIOĞLU, 2012)             | Expert Systems with Applications                               |
|                         | Número D-Teoria Grey                      | (LIU <i>et al.</i> , 2014a)            | Expert Systems with Applications                               |
|                         | AHP-VIKOR-DEMATEL                         | (LIU <i>et al.</i> , 2015)             | International Journal of Quality & Reliability Management      |
| Outras Abordagens       | Modelo Baseado em Custos                  | (GILCHRIST, 1993)                      | International Journal of Quality & Reliability Management      |
|                         | Modelo Baseado em Custos                  | (BEN-DAYA; RAOUF, 1996)                | International Journal of Quality & Reliability Management      |
|                         | Modelo Baseado em Custos                  | (RHEE; ISHII, 2003)                    | Advanced Engineering Informatics                               |
|                         | Modelo Kano                               | (SHAHIN, 2004)                         | International Journal of Quality & Reliability Management      |

| <b>Categoria</b>  | <b>Abordagem</b>         | <b>Autores / Ano</b>                | <b>Periódico</b>                                          |
|-------------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Outras Abordagens | QFD                      | (FERNANDES; REBELATO, 2006)         | Gestão e Produção                                         |
|                   | Modelo Baseado em Custos | (DONG, 2007)                        | International Journal of Quality & Reliability Management |
|                   | QFD                      | (BRAGLIA; FANTONI; FROSOLINI, 2007) | International Journal of Quality & Reliability Management |
|                   | Modelo Baseado em Custos | (AHSEN, 2008)                       | International Journal of Quality & Reliability Management |
|                   | QFD                      | (TANIK, 2010)                       | International Journal of Quality & Reliability Management |
|                   | MCS                      | (XIAO <i>et al.</i> , 2011)         | Engineering Failure Analysis                              |
|                   | Teoria da Probabilidade  | (SANT'ANNA, 2012)                   | International Journal of Quality & Reliability Management |
|                   | 2-tuple                  | (LIU <i>et al.</i> , 2014b)         | Quality and Reliability Engineering International         |

## APÊNDICE C - ROTEIRO PARA ENTREVISTA SOBRE FMEA

### PESQUISA SOBRE RECOMENDAÇÃO DE AÇÕES EM FMEA DE PROCESSO (INDÚSTRIA AUTOMOTIVA)

As **questões de 1 a 5** estão relacionadas com o perfil da empresa.

|                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1- Ramo de atuação:</b><br><input type="checkbox"/> Borrachas <input type="checkbox"/> Estampados <input type="checkbox"/> Fixadores <input type="checkbox"/> Tubos <input type="checkbox"/> Usinados <input type="checkbox"/> Outro: ____ |
| <b>2- Localização:</b><br><input type="checkbox"/> SP <input type="checkbox"/> RJ <input type="checkbox"/> MG <input type="checkbox"/> Outro: ____                                                                                            |
| <b>3- Maior nível de atuação na cadeia automotiva:</b><br><input type="checkbox"/> Tier 1 <input type="checkbox"/> Tier 2 <input type="checkbox"/> Tier 3 ou inferior                                                                         |
| <b>4- Número de funcionários:</b><br><input type="checkbox"/> De 0 a 100 <input type="checkbox"/> De 101 a 200 <input type="checkbox"/> De 201 a 300 <input type="checkbox"/> De 301 a 400 <input type="checkbox"/> Mais que 400              |
| <b>5- Atual ciclo de certificação ISO/TS16949</b><br><input type="checkbox"/> 1º <input type="checkbox"/> 2º <input type="checkbox"/> 3º <input type="checkbox"/> 4º ou superior                                                              |
| <b>6- Aplicação de FMEA</b><br><input type="checkbox"/> Processo <input type="checkbox"/> Projeto <input type="checkbox"/> Outro: ____                                                                                                        |

As **questões de 7 a 13** estão relacionadas com os critérios para recomendação de ações.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>7- Quantos critérios são adotados para a recomendação de ações em FMEA de Processo?</b><br><input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 ou mais                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>8- Há algum critério principal? Esse critério está baseado em qual fator?</b><br><input type="checkbox"/> NPR <input type="checkbox"/> Severidade <input type="checkbox"/> Ocorrência <input type="checkbox"/> Detecção <input type="checkbox"/> Combinação entre dois fatores<br>Se a resposta for "combinação entre dois fatores", citar aqui: ____                                                                        |
| <b>9- Há pontuação máxima nesse critério?</b><br><input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não<br>Se a resposta for "Sim", citar aqui: ____                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>10- Há algum critério secundário? Esse critério está baseado em qual fator?</b><br>(Responder apenas se a resposta da <b>questão 6</b> não for 1)<br><input type="checkbox"/> NPR <input type="checkbox"/> Severidade <input type="checkbox"/> Ocorrência <input type="checkbox"/> Detecção <input type="checkbox"/> Combinação entre dois fatores<br>Se a resposta for "combinação entre dois fatores", citar aqui: ____    |
| <b>11- Há pontuação máxima para o critério secundário?</b><br><input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não<br>Se a resposta for "Sim", citar aqui: ____                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>12- Há algum terceiro critério? Esse critério está baseado em qual fator?</b><br>(Responder apenas se a resposta da <b>questão 6</b> não for 1 ou 2)<br><input type="checkbox"/> NPR <input type="checkbox"/> Severidade <input type="checkbox"/> Ocorrência <input type="checkbox"/> Detecção <input type="checkbox"/> Combinação entre dois fatores<br>Se a resposta for "combinação entre dois fatores", citar aqui: ____ |
| <b>13- Há pontuação máxima para o terceiro critério?</b><br><input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não<br>Se a resposta for "Sim", citar aqui: ____                                                                                                                                                                                                                                                              |

### APÊNDICE D - MAPEAMENTO DAS RESPOSTAS

| #  | Critério          | Nível 1                 | Nível 2                 | Observação    |
|----|-------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|
| 1  | Critério Múltiplo | Severidade              | NPR                     | Sem valores   |
| 2  | Critério Múltiplo | Ocorrência              | NPR                     | Sem valores   |
| 3  | Critério Múltiplo | Severidade / Detecção   | Ocorrência              | Com valores   |
| 4  | Critério Múltiplo | Nota de Corte em NPR    | Severidade              | Com valores   |
| 5  | Critério Múltiplo | Severidade              | Ocorrência              | Sem valores   |
| 6  | Critério Múltiplo | Severidade              | NPR                     | Sem valores   |
| 7  | Critério Múltiplo | Nota de Corte em NPR    | Severidade / Ocorrência | Com valores   |
| 8  | Critério Múltiplo | Severidade              | Nota de Corte em NPR    | Com valores   |
| 9  | Critério Múltiplo | Severidade              | Nota de Corte em NPR    | Com valores   |
| 10 | Critério Múltiplo | Severidade              | Nota de Corte em NPR    | Com valores   |
| 11 | Critério Múltiplo | Severidade              | NPR                     | Sem valores   |
| 12 | Critério Múltiplo | Nota de Corte em NPR    | Severidade              | Sem valores   |
| 13 | Critério Múltiplo | NPR                     | Ocorrência              | Sem valores   |
| 14 | Critério Múltiplo | Severidade              | Ocorrência / Detecção   | Com valores   |
| 15 | Critério Múltiplo | Severidade              | Severidade / Ocorrência | Com valores   |
| 16 | Critério Múltiplo | Severidade              | Severidade / Ocorrência | Com valores   |
| 17 | Critério Múltiplo | Nota de Corte em NPR    | Severidade              | Com valores   |
| 18 | Critério Múltiplo | Severidade              | NPR                     | Sem valores   |
| 19 | Critério Múltiplo | NPR                     | Severidade / Ocorrência | Sem valores   |
| 20 | Critério Múltiplo | Severidade              | Severidade / Ocorrência | Sem valores   |
| 21 | Critério Múltiplo | Severidade              | NPR                     | Sem valores   |
| 22 | Critério Múltiplo | Severidade              | Nota de Corte em NPR    | Com valores   |
| 23 | Critério Simples  | Nota de Corte em NPR    | Nenhum                  | Com valores   |
| 24 | Critério Simples  | Nota de Corte em NPR    | Nenhum                  | Com valores   |
| 25 | Critério Simples  | Severidade / Ocorrência | Nenhum                  | Sem valores   |
| 26 | Critério Simples  | Nota de Corte em NPR    | Nenhum                  | Com valores   |
| 27 | Critério Simples  | NPR                     | Nenhum                  | Cinco maiores |
| 28 | Critério Simples  | Severidade              | Nenhum                  | Com valores   |
| 29 | Critério Simples  | Nota de Corte em NPR    | Nenhum                  | Com valores   |
| 30 | Critério Simples  | Nota de Corte em NPR    | Nenhum                  | Com valores   |
| 31 | Critério Simples  | Severidade              | Nenhum                  | Com valores   |
| 32 | Critério Simples  | Nota de Corte em NPR    | Nenhum                  | Com valores   |
| 33 | Critério Simples  | Severidade              | Nenhum                  | Com valores   |
| 34 | Critério Simples  | Nota de Corte em NPR    | Nenhum                  | Com valores   |
| 35 | Critério Simples  | Nota de Corte em NPR    | Nenhum                  | Com valores   |
| 36 | Critério Simples  | Severidade              | Nenhum                  | Com valores   |
| 37 | Critério Simples  | Nota de Corte em NPR    | Nenhum                  | Com valores   |
| 38 | Critério Simples  | NPR                     | Nenhum                  | Cinco maiores |
| 39 | Critério Simples  | NPR                     | Nenhum                  | Cinco maiores |