

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

RAFAEL LAURENTI

**Sistematização de problemas e práticas da
análise de falhas potenciais no processo de
desenvolvimento de produtos**

São Carlos

2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

RAFAEL LAURENTI

**Sistematização de problemas e práticas da
análise de falhas potenciais no processo de
desenvolvimento de produtos**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Titular Henrique Rozenfeld

São Carlos

2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

L383s Laurenti, Rafael
 Sistematização de problemas e práticas da análise de falhas potenciais no processo de desenvolvimento de produtos / Rafael Laurenti ; orientador Henrique Rozenfeld -- São Carlos, 2010.

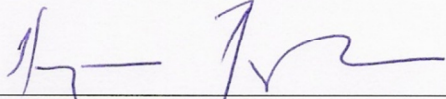
 Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Área de Concentração em Gestão de Projetos e Gerenciamento de Produtos) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

 1. Engenharia de produção. 2. Análise de falhas potenciais. 3. Problemas. 4. Práticas. 5. FMEA. 5. DRBFM. 6. Processo de desenvolvimento de produtos. Título.

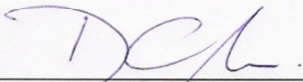
FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RAFAEL LAURENTI**.

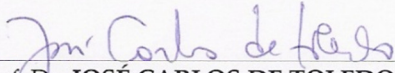
Dissertação defendida e julgada em 23/07/2010 perante a Comissão Julgadora:



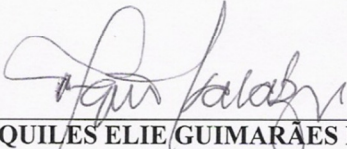
Prof. Titular **HENRIQUE ROZENFELD – (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) aprovado



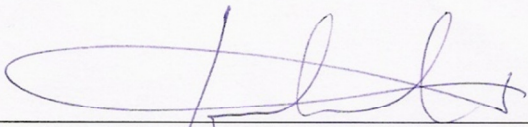
Prof. Dr. **DANIEL CAPALDO AMARAL**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO



Prof. Dr. **JOSÉ CARLOS DE TOLEDO**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar) APROVADO



Prof. Associado **AQUILES ELIE GUIMARÃES KALATZIS**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção



Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

*Dedico este trabalho aos meus pais, Tadeu e Ana,
e aos meus irmãos, Ricardo e Nicolle.*

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado ao longo de dois anos e meio. Esse foi um período muito importante para mim. Período de aprendizado e descoberta de muitas coisas, e que tive a oportunidade de conviver com pessoas geniais.

Agradeço, ao Professor Titular Henrique Rozenfeld, pela orientação e pela paciência que teve comigo durante o mestrado, pelos exemplos de dedicação ao trabalho e de conduta. Que me ensinou muito nos anos de convivência.

Ao Professor Daniel Amaral, pela contribuição na minha formação acadêmica e na elaboração do trabalho de mestrado.

Ao Professor José Carlos de Toledo pelas correções e sugestões apresentadas na defesa do trabalho. Foi uma honra tê-lo na Comissão Julgadora.

Ao colega Erwin Karl Franieck, pelas contribuições decisivas para execução do trabalho.

À Escola de Engenharia de São Carlos, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao Professor Aldo Ometto pelos conhecimentos transmitidos durante a disciplina Engenharia do Ciclo de Vida.

À empresa e aos profissionais que gentilmente participaram do estudo de caso.

Aos colegas do grupo Engenharia Integrada, Sayuri, Véio, Jana, Maicon, Dani, Vitor, Fernando, André, Ana, Mauro, João, Guilherme, Camila, Edivandro, Rapha pelo convívio, amizade e pelas valiosas contribuições a este trabalho. Um agradecimento especial ao Bruno Villari, pela imensa ajuda na realização da revisão bibliográfica sistemática.

Aos servidores do SEP, pelo apoio nas questões de organização.

Aos amigos de longa data Molusco e Med, pelas conversas e ajuda em revisões de textos.

Aos meus pais, Tadeu e Ana, pelo incentivo, entendimento, apoio, paciência, e, principalmente, pela renúncia as suas vidas para me proporcionar sempre tudo que precisei. Agradeço ao meu pai pela cuidadosa revisão de texto do trabalho final.

Muito obrigado.

RESUMO

LAURENTI, R. **Sistematização de problemas e práticas da análise de falhas potenciais no processo de desenvolvimento de produtos**. 2010. 180p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.

A análise de falhas potenciais compreende o uso de técnicas sistemáticas (métodos) durante o Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) que utilizam conhecimentos tácitos de engenharia para prever possíveis falhas, tanto do projeto (*design*) do produto quanto de seu processo de fabricação, e propor ações que evitem a ocorrência dessas falhas. O problema prático que motiva a realização deste trabalho é a dificuldade enfrentada pelas empresas em alcançar plenamente todos os benefícios decorrentes da aplicação da análise de falhas potenciais. O exame do estado da arte indica que há diversos problemas e práticas propostas para minimizar esses problemas dispersos na literatura. Existem também empresas *benchmark* na aplicação de métodos de análise de falhas potenciais que podem ser estudadas para o levantamento de outras práticas. Assim, o trabalho tem como objetivo sistematizar os problemas e práticas presentes na literatura e práticas empregadas por uma empresa *benchmark*. A fim de atingir esse objetivo, são gerados dois resultados principais. O primeiro, alcançado por meio de uma Revisão Bibliográfica Sistemática, é o agrupamento dos problemas e das práticas de análise de falhas potenciais presentes na literatura em categorias. Os 37 problemas encontrados foram agrupados em: Definição do risco, Recursos, Integração PDP, Temporal, Cultura organizacional, Gestão de informações, Procedimentos e Comportamental; e as 161 práticas em Abordagem, Ferramenta, *Framework*, Método, Software e Diretriz. O segundo resultado, obtido a partir de um estudo de caso, são práticas empregadas por uma empresa que é referência na aplicação dos métodos de análise de falhas potenciais FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) e DRBFM (*Design Review Based on Failure Mode*). Os resultados do estudo de caso sugerem que o sucesso da execução dos métodos FMEA e DRBFM, na unidade de negócio caso, deve-se à combinação de provisão de recursos, trabalho em equipe multidisciplinar, formação de competências (treinamento), definição de procedimentos, aplicação integrada com outros métodos/ferramentas do PDP, e,

sobretudo, não considerar a aplicação como atividade *pro forma*. Os conhecimentos gerados nesse trabalho podem contribuir para auxiliar as empresas a alcançarem os benefícios da aplicação de métodos de análise de falhas potenciais no processo de desenvolvimento de produtos.

Palavras-chave: Análise de falhas potenciais. Problemas. Práticas. FMEA. DRBFM. Processo de desenvolvimento de produtos.

ABSTRACT

LAURENTI, R. **Systematization of problems and practices of potential failure analysis in the process of new product development.** 2010. 180p. Thesis (Master) – Engineering School of Sao Carlos, University of Sao Paulo, 2010.

The potential failure analysis is the application of systematic techniques (methods) in the process of New Product Development (NPD) that make the use of tacit engineering knowledge to predict possible design and manufacturing process failures and to define countermeasures. The practical problem which motivates the accomplishment of this research is the challenge companies face in achieving the full benefits that can be yield with the application of methods of potential failure analysis. The status of the research carried out in the field shows that there are many problems related to that challenge and practices proposed to mitigate these problems, dispersed in the literature. Notwithstanding the practices later cited, benchmark companies in applying methods of potential failure analysis can be investigated for discovering more practices. The goal of this study is to systematize both the problems and practices reported in the literature and the practices adopted by a benchmark company. In meeting that goal, this research delivered two main outcomes. First, through a Systematic Literature Review, is the sorting of the problems and practices cited in the literature. The 37 problems found were categorised in the classes: Definition of risk, Resources, NPD integration, Moment, Organizational culture, Information management, Procedures and Behavioural; and the 161 practices in Approach, Tool, Framework, Method, Software and Guideline. The second outcome, accomplished through a case study, is a set of practices employed by a company which is reference in applying the FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) e DRBFM (Design Review Based on Failure Mode) methods. The findings suggest that the successful execution of the FMEA and DRBFM methods, in the business unit case, is due to a combination of provision of resources, employing multi-disciplinary teams, training, defining and documenting the process of application, integrating the application of these methods with others NPD methods/tools, and, mainly, not considering the application a perfunctory task. It is believed that the knowledge resulted from this research might assist companies to

get benefits from the methods of potential failure analysis applied into the process of new product development.

Keywords: Potential Failure Analysis. Problems. Practices. FMEA. DRBFM. New product development.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Organização do texto	24
Figura 2 - Capítulos da síntese da bibliografia fundamental.....	26
Figura 3 - FMEA de sistema, DFMEA e PFMEA (BERTSCHE, 2008).....	28
Figura 4 - Típico formulário de FMEA, estrutura de árvore e principais informações que são inseridas no formulário (AIAG, 2008; BERTSCHE, 2008).....	31
Figura 5 - Visão estrutural das informações do FMEA (ROZENFELD et al., 2006)..	34
Figura 6 - Time de FMEA composto de colaboradores da área de Projeto, Planejamento da produção, Produção, Vendas, Suprimentos, Qualidade, Teste e Manufatura.....	35
Figura 7 - Símbolos lógicos do FTA (LEVIN e KALAL, 2003)	43
Figura 8 - Procedimento básico para a estruturação de uma árvore de falhas (BERTSCHE, 2008).....	44
Figura 9 - Etapas da construção da árvore de falhas (CLEMENS, 2002).....	45
Figura 10 - Comparação entre o FMEA e o FTA	46
Figura 11 - Tela de um exemplo de estrutura de sistemas.....	49
Figura 12 - Matriz do FMEA e exemplo de um gráfico de Pareto	50
Figura 13 - Planilha de acompanhamento de ações.....	51
Figura 14 - Conteúdo do capítulo 3	54
Figura 15 - Representação do Modelo Unificado (ROZENFELD et al., 2006).....	56
Figura 16 - Tipos de ciclos da fase de projeto detalhado (ROZENFELD et al., 2006)	58
Figura 17 - Desdobramento dos SSC e sua integração ao projeto conceitual e detalhado (ROZENFELD et al., 2006)	59
Figura 18 - Visão geral dos métodos de avaliação dos SSC (ROZENFELD et al., 2006).....	59
Figura 19 - Momentos e fases da sequência proposta	61
Figura 20 - Fluxograma da fase de planejamento	63
Figura 21 - Fluxograma da atividade Definir Foco	64
Figura 22 - Fluxograma da fase de Condução das sessões de análise	68
Figura 23 - Fluxograma da fase de Gerenciamento de Ações.....	72
Figura 24 - Fases da pesquisa	80
Figura 25 - Processo de Condução de Revisão Sistemática (BIOLCHINI et al., 2005)	81

Figura 26 - <i>Printscreen</i> de parte da tabela de arquivamento das informações extraídas das publicações selecionadas	90
Figura 27 - <i>Printscreen</i> de parte da matriz de relacionamento entre os problemas da análise de falhas potenciais e o nome do artigo que o citou	91
Figura 28 - Distribuição anual dos estudos selecionados	91
Figura 29 - Distribuição de estudos por país de origem	92
Figura 30 - Quantidade de Abordagens, Ferramentas, Frameworks, Métodos, Softwares e Diretrizes encontradas na revisão sistemática	97
Figura 31 - Exemplos de relações de causa-efeito dentre os problemas da análise de falhas potenciais.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Casos de avaliação de riscos	33
Tabela 2 - Comparação das características do FMEA e do FTA.....	46
Tabela 3 - Softwares comerciais de FMEA.....	48
Tabela 4 - Número de artigos encontrados e selecionados.....	89
Tabela 5 - Número de publicações por local de publicação.....	92
Tabela 6 - Lista dos problemas ordenados pela frequência de aparecimento nos estudos selecionados da revisão sistemática	94
Tabela 7 - Respostas relacionadas à conformidade com práticas da literatura (questões sim/não)	106
Tabela 8 - Respostas relacionadas aos benefícios advindos da aplicação dos métodos (escala 1 a 10)	107
Tabela 9 - Respostas referentes a treinamento e trabalho em equipe (escala 1 a 10)	107
Tabela 10 - Ferramentas utilizadas para auxiliar o DFMEA/PFMEA/DRBFM.....	108
Tabela 11 - Itens de avaliação da aplicação do software de apoio – DFMEA/PFMEA/DRBFM	109
Tabela 12 - Itens de avaliação da aplicação do FTA	110
Tabela 13 - Resultados da avaliação da qualidade do <i>processo</i> de aplicação dos métodos sob a perspectiva da capabilidade (escala 1a 10)	111
Tabela 14 - Respostas do instrumento de avaliação da qualidade dos <i>resultados</i> da aplicação dos métodos FMEA e DRBFM (questões sim/não)	113
Tabela 15 - Respostas do questionário de avaliação da qualidade dos resultados da aplicação dos métodos FMEA e DRBFM (escala 1 a 10).....	113
Tabela 16 - Relação entre as perguntas de pesquisa, os objetivos específicos e os resultados do trabalho	116
Tabela 17 - Lista dos problemas da análise de falhas potenciais e artigos o os citaram.....	133

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - <i>Checklist</i> para se identificar mudanças (ALLAN, 2009)	39
Quadro 2 - Exemplo de tabela de comparação (SHIMIZU, OTSUKA e NOGUCHI, 2007)	40
Quadro 3 - Exemplo de formulário DRBFM (SHIMIZU, IMAGAWA e NOGUCHI, 2003)	40
Quadro 4 - Exemplo ilustrativo de uma matriz que relaciona funções e mudanças ..	41
Quadro 5 - Cabeçalho da planilha para registrar informações extraídas das publicações selecionadas.....	83
Quadro 6 - Cabeçalho da planilha para registrar os problemas citados nas publicações selecionadas.....	83

LISTA DE SIGLAS

AIAG	Automotive Industry Action Group
BPMN	Business Process Modelling Notation
CMMI-DEV	Capability Maturity Model Integration for Development
DRBFM	Design Review Based on Failure Mode
DFMEA	Design Failure Mode and Effect Analysis
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
FMECA	Failure Mode, Effect and Criticality Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
QFD	Quality Function Deployment
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produtos
PFMEA	Process Failure Mode and Effect Analysis
RBS	Revisão Bibliográfica Sistemática
RPN	Risk Priority Number
SSC	Sistema, Subsistema e Componente
VDA	Verband der Automobilindustrie

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Contexto e motivação	19
1.2. Questões de pesquisa e objetivos do trabalho	23
1.3. Delimitação do escopo do trabalho	23
1.4. Organização deste texto	24
2. MÉTODOS DE ANÁLISE DE FALHAS POTENCIAIS	26
2.1. FMEA – Failure Mode and Effect Analysis	26
2.1.1 Desenvolvimento histórico	29
2.1.2 Processo de aplicação	30
2.1.3 Times	34
2.2. DRBFM – Design Review Based on Failure Mode	36
2.2.1 Desenvolvimento histórico	37
2.2.2 Processo de aplicação	38
2.3. FTA – Fault Tree Analysis	42
2.3.1 Desenvolvimento histórico	43
2.3.2 Processo de aplicação	44
2.4. Comparação entre os métodos de análise de falha	45
2.4.1 FTA e FMEA	45
2.4.2 FMEA e DRBFM	46
2.5. Softwares comerciais para realização do FMEA e do DRBFM	47
2.5.1 IQ-FMEA - APIS	48
2.5.2 Xfmea - ReliaSoft	52
3. A ANÁLISE DE FALHAS POTENCIAIS NO CONTEXTO DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO	54
3.1. Aplicação dos métodos DFMEA/PFMEA/DRBFM no PDP	55
3.2. Sequência de realização do FMEA e do DRBFM	61
3.2.1 Preparação	62
3.2.2 Fase de Planejamento	63
3.2.3 Fase de Condução das sessões de análise de falhas	67
3.2.4 Fase de Gerenciamento de ações	71
3.3. Discussão inicial sobre problemas e práticas da análise de falhas potenciais	72
4. METODOLOGIA CIENTÍFICA E FASES DA PESQUISA	76
4.1. Pesquisa como uma forma de contribuição para o conhecimento	76
4.1.1 Contribuição do estudo	77
4.2. Métodos qualitativos e quantitativos	77
4.2.1 O método qualitativo aplicado ao estudo	78
4.3. Métodos de procedimento	78
4.3.1 Método de procedimento adotado	79

4.4. Fases da pesquisa	79
4.4.1 Fase 1: Definição do trabalho	80
4.4.2 Fase 2: Revisão bibliográfica	80
4.4.3 Fase 3: Revisão bibliográfica sistemática	81
4.4.4 Fase 4: Estudo caso	84
4.4.5 Fase 5: Elaboração das conclusões e identificação de trabalhos futuros	88
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA	89
5.1. Distribuição das publicações	91
5.2. Problemas	93
5.3. Práticas	96
6. ESTUDO DE CASO	105
6.1. Avaliação da qualidade do <i>Processo</i> de aplicação dos métodos FMEA e DRBFM	105
6.2. Avaliação da qualidade dos Resultados da aplicação dos métodos FMEA e DRBFM	112
7. CONCLUSÕES	116
7.1. Resultados do trabalho	116
7.2. Sugestões para trabalhos futuros	119
APÊNDICE A – PASSOS PARA APLICAÇÃO INTEGRADA DO FTA COM O FMEA	121
APÊNDICE B – LISTA DE PUBLICAÇÕES SELECIONADAS NA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA	123
APÊNDICE C – LISTA DAS FONTES QUE TIVERAM APENAS UM ARTIGO SELECIONADO NA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA	131
APÊNDICE D – PROBLEMAS E ARTIGOS QUE ELES FORAM CITADOS	133
APÊNDICE E – DESCRIÇÃO DAS PRÁTICAS ENCONTRADAS NA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA	135
APÊNDICE F – INSTRUMENTO DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO PROCESSO DE APLICAÇÃO DOS MÉTODOS FMEA E DRBFM SOB A PERSPECTIVA DA CONFORMIDADE COM PRÁTICAS DESCRITAS NA LITERATURA	159
APÊNDICE G – INSTRUMENTO DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO PROCESSO DE APLICAÇÃO DOS MÉTODOS FMEA E DRBFM SOB A PERSPECTIVA DA CAPABILIDADE	165
APÊNDICE H – INSTRUMENTO DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DOS MÉTODOS FMEA E DRBFM	168

1. INTRODUÇÃO

A análise de falhas potenciais pode ser entendida como o uso de técnicas sistemáticas (métodos) durante o Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) que empregam de conhecimentos tácitos de engenharia para prever possíveis maneiras segundo as quais poderiam ocorrer falhas tanto do projeto (*design*) do produto quanto de seu processo de fabricação. Segundo a Norma NBR 5462-1994,

[...] a falha é o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida. É a redução total ou parcial da capacidade de uma peça, componente ou máquina de desempenhar a sua função durante um período de tempo, quando o item deverá ser reparado ou substituído. A falha leva o item a um estado de indisponibilidade.

Falhas no projeto (*design*) do produto ocorrem quando o produto não resguarda o usuário contra riscos de ferimento, não executa as funções ou atende aos requisitos estabelecidos, cria efeitos colaterais perigosos, ou não minimiza consequências desastrosas caso um acidente ocorra. (STAMATIS, 1995). Já as falhas no processo de fabricação ocorrem quando o produto não atende às especificações estabelecidas para a fabricação do produto. Isto pode ser devido à: (1) defeitos na matéria-prima ou nos componentes utilizados na fabricação do produto; (2) falhas no processo de fabricação; (3) erros de montagem (STAMATIS, 1995).

Neste capítulo são apresentados: o contexto e a motivação para realização desta pesquisa (item 1.1), suas questões de pesquisa e seus objetivos (item 1.2), a delimitação do escopo do trabalho (item 1.3), e, por fim a organização do texto (item 1.4).

1.1. Contexto e motivação

As corporações enfrentam desafios mandatórios de reduzir custos, desenvolver produtos mais rapidamente e atender às exigências dos consumidores por produtos confiáveis (WOMACK, JONES e ROOS, 1992). A habilidade de colocar no mercado produtos que desempenhem adequadamente suas funções, com menor número possível de falhas, pode distinguir as melhores empresas das demais (SOBEK, WARD e LIKER, 1999). Os rápidos avanços tecnológicos, a diminuição do ciclo de vida dos produtos e o aumento de suas funcionalidades tornam cada vez mais complexa a tarefa de desenvolver produtos com alta qualidade e confiabilidade.

Nos últimos 20 anos, as empresas têm desenvolvido mais projetos incrementais de produtos e menos projetos que adicionam linhas de produtos em seus portfólios (BARCZAK, GRIFFIN e KAHN, 2009). Corroborando com essa afirmação, Gerst et al. (2001), Clarkson, Simons e Eckert (2004) asseveram que a maioria dos novos produtos é projetada por meio de modificações em produtos existentes, ou seja, que o desenvolvimento de produtos envolve a contínua evolução de um *design* inicial. São realizadas modificações não só para atender às necessidades existentes, desejos emergentes ou expectativas latentes dos consumidores (LAUGLAUG, 1993), como também para melhorar o desempenho dos produtos ou corrigir defeitos (ECKERT, CLARKSON e ZANKER, 2004).

No entanto, mudanças de engenharia podem introduzir novas falhas potenciais no produto (CHAO e ISHII, 2007; SCHMITT et al., 2007), e falhas afetam a qualidade e disponibilidade do produto e causam prejuízos tanto para o fabricante quanto para o usuário. Conforme relata Rizzotto (2003), isso é particularmente verdadeiro na indústria automobilística. O autor apresenta um caso ocorrido em 1999 nos Estados Unidos em que a *General Motors* (GM) foi condenada a pagar quatro bilhões e novecentos milhões de dólares em uma única ação indenizatória. A decisão da justiça foi baseada, dentre outras provas, em documentos internos da própria GM que comprovaram que a empresa sabia do problema, mas preferiu ocultá-lo para não gastar entre quatro a onze dólares por veículo, se procedesse ao respectivo recall (RIZZOTTO, 2003). No Brasil, segundo dados do portal Estradas¹, entre os anos de 2000 a 2009 mais de cinco milhões e trezentos mil veículos sofreram recalls.

Revelações de defeitos nos produtos, como nos recalls, além de prejuízos financeiros, afetam negativamente a reputação das montadoras perante o mercado (DAVIDSON e WORRELL, 1992; RHEE e HAUNSCHILD, 2006; BATES et al., 2007) com conseqüente perdas no valor da marca e das ações (BARBER e DARROUGH, 1996; BATES et al., 2007) e queda nas vendas (HAUNSCHILD e RHEE, 2004; BATES et al., 2007). Além de resultados anormais para as corporações, produtos defeituosos levam a maiores impactos ambientais, pois mesmo que eles tenham sido projetados para serem duráveis, terão de ser reparados ou substituídos (VEZZOLI e MANZINI, 2008).

¹ www.estradas.com.br

A avaliação da qualidade e confiabilidade de um produto é tradicionalmente feita nos estágios avançados de seu desenvolvimento, por meio de testes e simulações, e aplicação de técnicas estatísticas e teoria probabilística (LEVIN e KALAL, 2003; YANG, 2007; BERTSCHE, 2008). Esta disciplina é denominada Engenharia de Confiabilidade (YANG, 2007). Para Yang (2007) e Bertsche (2008) “confiabilidade” é definida como sendo a probabilidade que um produto, sistema, subsistema ou componente desempenhar sua função especificada sem falhas sob condições definidas em um determinado período de tempo. Quando um projeto (*design*) de produto for voltado para a confiabilidade ele é denominado DfR (*Design for Reliability*). Usualmente o DfR consiste das atividades de planejamento da confiabilidade, design, teste e análise (YANG, 2007).

O desafio defrontado pelas empresas, contudo, é de prever a maior quantidade de falhas potenciais nos estágios iniciais do processo de desenvolvimento de produtos (PDP).

Adotar uma abordagem proativa de antecipação de falhas pode diminuir a quantidade de *redesigns* (alterações de projeto) (KARA-ZAITRI et al., 1991) e de testes em protótipos (para avaliação e validação) necessários para o desenvolvimento do produto (SEGISMUNDO e MIGUEL, 2008). Além disso, benefícios financeiros também podem ser alcançados, já que o custo para realizar uma modificação aumenta exponencialmente no decorrer das fases do processo de desenvolvimento de produtos (BOOKER, RAINES e SWIFT, 2001; ROZENFELD et al., 2006). Assim, as organizações que usam corretamente os métodos de análise de falhas potenciais poupam recursos financeiros e apresentam níveis elevados de satisfação dos clientes.

Vários métodos e ferramentas podem ser utilizados no PDP para antecipar falhas no projeto (*design*) do produto e de seu processo de fabricação. O método mais utilizado na indústria é o FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis* – Análise dos Modos e Efeitos de Falhas) (STAMATIS, 1995; HAWKINS e WOOLLONS, 1998; STONE, TUMER e STOCK, 2005). No início da década de 80 as empresas automotivas que formam a AIAG (*Automotive Industry Action Group*) incorporaram formalmente o FMEA, por meio da norma QS-9000 (atual ISO/TS 16949²), em seus processos de desenvolvimento de produtos. Este movimento foi seguido pela

² A ISO/TS 16949 é um padrão internacional para sistemas de gestão da qualidade, mais especificamente para a indústria automotiva e tem como base a norma ISO 9001

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

Além do FMEA, a indústria automobilística tem aplicado com sucesso um método derivado do FMEA chamado DRBFM (*Design Review Based on Failure Mode – Revisão de Projeto Baseada nos Modos de Falha*) para analisar de maneira sistemática mudanças de engenharia que possam levar a falhas técnicas. O objetivo é descobrir as causas raiz das novas falhas e propor soluções para eliminá-las (SHIMIZU, IMAGAWA e NOGUCHI, 2003; SCHORN, 2005; SCHORN e KAPUST, 2005; SCHMITT *et al.*, 2007).

No entanto, muitas empresas não utilizam plenamente todos os benefícios que os métodos de análise de falhas potenciais põem a disposição (DEVADASAN *et al.*, 2003; BLUVBAND, POLAK e GRABOV, 2005; BRAGLIA, FANTONI e FROSOLINI, 2006; CHAO e ISHII, 2007; AJAYI e SMART, 2008). Essas empresas não os vêem como ferramentas poderosas, mas sim como uma tarefa burocrática de preenchimento de formulário, necessária apenas para cumprir requisitos de auditorias da qualidade ou solicitações de clientes (KARA-ZAITRI *et al.*, 1991; JOHNSON, K.G. e KHAN, M. K., 2003), não esperando, portanto, nenhum benefício da aplicação (JOHNSON, K.G. e KHAN, M. K., 2003). A principal causa dessa disfunção reside no fato de que a maior parte desses métodos não são totalmente entendidos tecnicamente, sendo construídos e usados incorretamente (JOHNSON, K.G. e KHAN, M. K., 2003).

Outros problemas de aplicação dos métodos de análise de falhas potenciais são relatados em grande quantidade de publicações. Por outro lado, existe grande quantidade de estudos que apresentam práticas³ propostas para solucionarem esses problemas. Além disso, também existem empresas *benchmark* na aplicação de métodos de análise de falhas potenciais que podem ser estudadas pela academia para o levantamento das práticas empregadas.

Assim apresenta-se como oportunidade de pesquisa sistematizar os problemas e práticas presentes na literatura e práticas empregadas por uma

³ Neste trabalho “prática” é o termo genérico adotado para designar qualquer técnica, método, ferramenta, procedimento ou um processo que pode melhorar os processos de negócio de uma empresa (JARRAR e ZAIRI, 2000).

empresa benchmark. Partindo dessa constatação, são formuladas as questões de pesquisa e os objetivos deste estudo.

1.2. Questões de pesquisa e objetivos do trabalho

As **questões de pesquisa** que se pretende responder são:

1. Quais são os problemas e práticas da análise de falhas potenciais relatados na literatura?
2. Quais práticas são empregadas por uma empresa que é referência em análise de falhas potenciais?

O **objetivo geral** do estudo é: “Sistematizar problemas e práticas da análise de falhas potenciais”

O significado semântico de sistematizar expressa a ideia de organizar, reduzir, ordenar segundo um ou mais critérios um conjunto de elementos. Neste trabalho o termo sistematizar significa levantar, analisar, sumarizar e classificar. Portanto, para se atingir o objetivo principal são formulados dois **objetivos específicos**:

1. Identificar, analisar, sumarizar e classificar problemas e práticas da aplicação da análise de falhas potenciais descritas na literatura; e
2. Identificar, analisar, e sumarizar, práticas empregadas por uma empresa referência em análise de falhas potenciais.

1.3. Delimitação do escopo do trabalho

Este trabalho é focado nos setores de manufatura de bens de consumo duráveis e de bens de capital. A justificativa para essa delimitação é baseada em dois argumentos principais. A análise de falhas potenciais desenvolveu-se mais intensamente nesses setores, sobretudo na indústria automotiva. Esse é o foco de grande parte das pesquisas e da bibliografia disponível na área. Assim, o escopo de investigação do trabalho é voltado ao processo de desenvolvimento de produtos nesses segmentos industriais.

Os métodos de análise de falhas potenciais tratados são o FMEA, o DRBFM e o FTA (*Fault Tree Analysis*). As justificativas para a escolha desses três métodos são: o FMEA é o método de análise de falhas potenciais mais utilizado na indústria; o DRBFM, que é uma variação do FMEA, vem sendo aplicado com sucesso na

indústria automotiva; a inclusão do FTA se deu pelo fato de que ele é um método que apóia tanto o FMEA quanto o DRBFM.

1.4. Organização deste texto

Este texto está estruturado em sete capítulos, organizados de acordo com a sequência ilustrada na Figura 1.

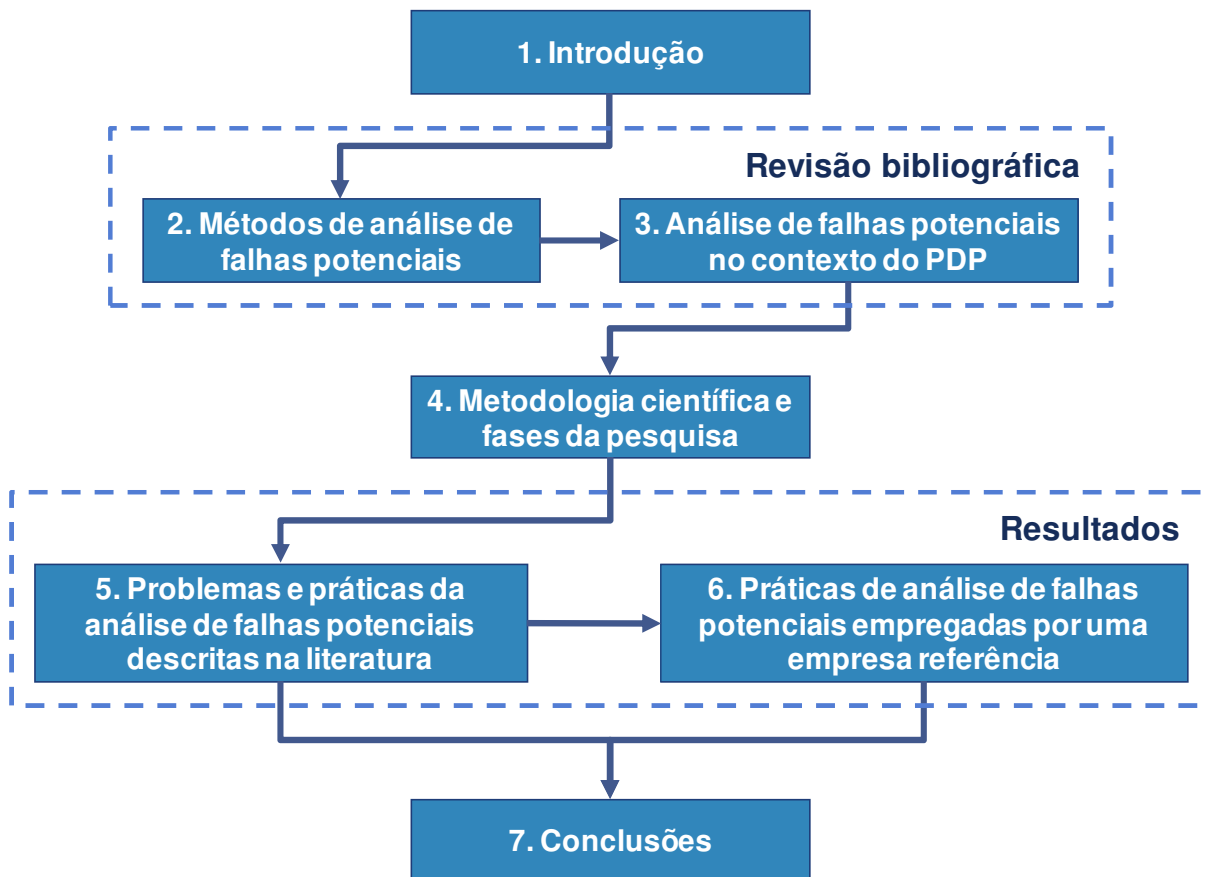


Figura 1 - Organização do texto

No capítulo 1 (Introdução), são apresentados o contexto e os objetivos do trabalho. O contexto compreende a discussão da importância da prevenção de falhas no processo de desenvolvimento de produtos (PDP). O entendimento da importância da prevenção de falhas permite a identificação de uma lacuna de pesquisa – existe grande quantidade de problemas e de práticas da análise de falhas potenciais não sistematizados. A fim de preencher essa lacuna, são detalhadas as perguntas de pesquisa e são definidos os objetivos do trabalho.

A revisão bibliográfica está organizada em dois capítulos (2 e 3). No capítulo 2, são apresentados conceitos de três métodos de análise de falhas potenciais

(FMEA, DRBFM, e FTA), temas principais do trabalho; e no capítulo 3, é discutida a análise de falhas potenciais no contexto do PDP.

A metodologia científica e as fases da pesquisa estão descritas no capítulo 4. Esse capítulo inclui a descrição dos procedimentos técnicos adotados para sistematizar: problemas e práticas da análise de falhas potenciais presentes na literatura (questão de pesquisa 1 e objetivo específico 1); práticas empregadas por uma empresa referência na aplicação de métodos de análise de falhas potenciais (questão de pesquisa 2 e objetivo específico 2). Os resultados das duas sistematizações são apresentados respectivamente nos capítulos 5 e 6.

O texto é encerrado com o capítulo 7, no qual são discutidas as conclusões e apresentadas as sugestões para trabalhos futuros na área de pesquisa.

2. MÉTODOS DE ANÁLISE DE FALHAS POTENCIAIS

A revisão bibliográfica está organizada em dois capítulos, que constituem a base conceitual deste trabalho. O primeiro capítulo é dedicado aos métodos de análise de falhas potenciais FMEA, DRBFM e FTA e à softwares que auxiliam no desenvolvimento do FMEA e do DRBFM (capítulo 2). O segundo capítulo aborda as atividades de aplicação desses métodos no contexto das demais atividades do processo de desenvolvimento de produtos, apresenta uma sequência detalhada de realização do FMEA e do DRBFM, e faz uma discussão inicial sobre os problemas e práticas da análise de falhas potenciais (capítulo 3), que é complementada no capítulo 5 por uma revisão bibliográfica sistemática. Veja Figura 2.

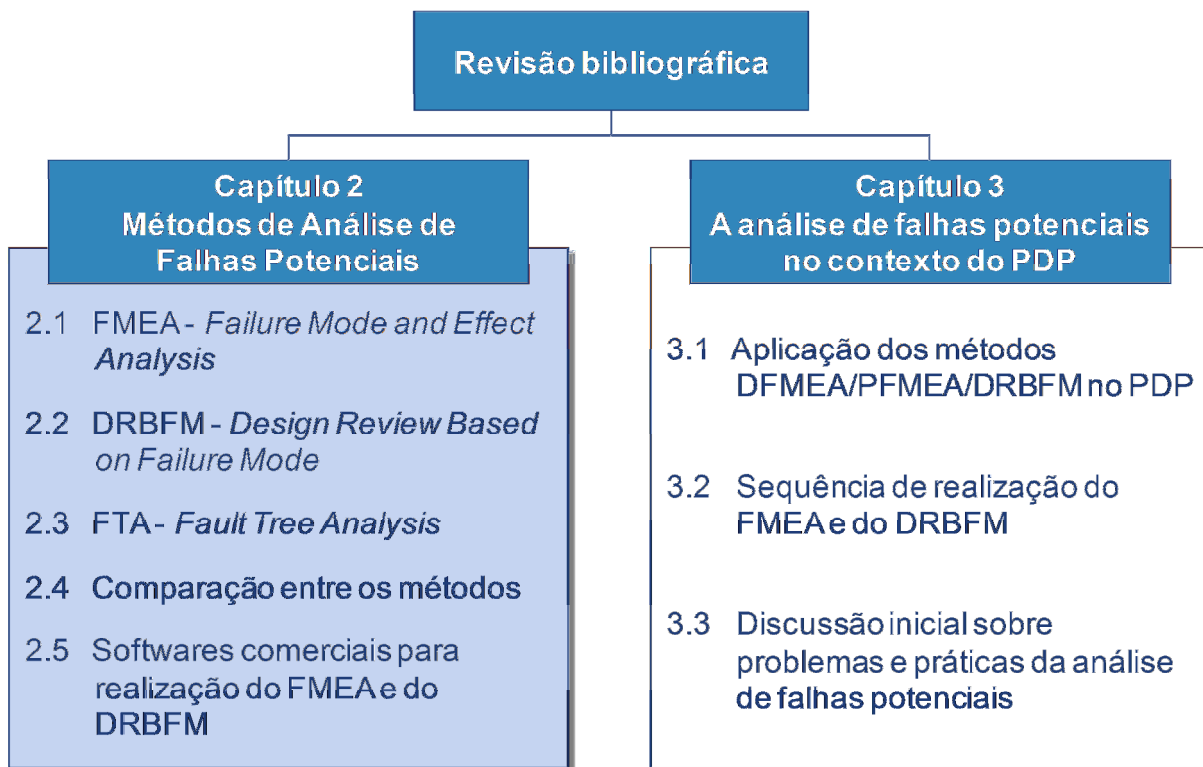


Figura 2 - Capítulos da síntese da bibliografia fundamental

2.1. FMEA – Failure Mode and Effect Analysis

A sigla FMEA é a abreviação para *Failure Mode and Effects Analysis* (Análise do Modo e Efeitos de Falha). O FMEA é um método de engenharia usado para definir, identificar, e eliminar falhas conhecidas e/ou potenciais de um projeto (*design*) de produto e/ou de seu processo de fabricação antes que elas cheguem ao cliente (STAMATIS, 1995). Isto é feito em uma sessão de FMEA, onde são reunidas pessoas advindas de diferentes áreas de empresa, com conhecimentos técnicos

variados, para se determinar, de maneira sistemática, todos os possíveis modos de falha potencial, os efeitos e as causas de cada modo de falha sobre o desempenho do produto, avaliar os riscos e especificar ações de melhoria (MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009).

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

Segundo Stamatis (2005) existem quatro tipos principais de FMEA. São eles:

1. **FMEA de sistema** (*System FMEA*) – Usado para analisar sistemas e subsistemas no início do desenvolvimento do conceito e do projeto (*design*). Um FMEA de sistema foca nos modos de falhas potenciais, causados por deficiências do sistema, ou das funções do sistema. Nas análises são incluídas interações entre sistemas e entre elementos (subsistemas) de um sistema;

2. **FMEA de produto** (*Design FMEA – DFMEA*) – Usado para analisar produtos antes de sua liberação para a fabricação. Um DFMEA foca em modos de falha causados por deficiências de projeto do produto (*design*);

3. **FMEA de processo** (*Process FMEA – PFMEA*) – Usado para analisar processos de fabricação e montagem. Um PFMEA é focado em modos de falha causados por deficiências de processo de fabricação ou montagem; e

4. **FMEA de serviço** (*Service FMEA*) – Usado para analisar serviços antes de eles chegarem ao consumidor. Um FMEA de serviço foca em modos de falha (tarefas, erros, enganos) causados por deficiências do sistema ou do processo.

Uma variação do FMEA comumente aplicada em itens (produto, peça, sistema, subsistema, componente) que devem apresentar alta confiabilidade é o FMECA (*Failure Mode, Effect and Criticality Analysis*). O método FMECA adiciona ao FMEA uma análise quantitativa da criticidade da falha, contudo, a sigla FMEA é usualmente usada com sinônimo de FMECA (RAUSAND e HØYLAND, 2004).

“Análise de criticidade” é definida pela norma MIL-STD-1629A (UNITED STATES MILITARY STANDARD, 1980) como sendo um procedimento para listar modos de falha hierarquizados pela combinação da severidade e do índice de

criticidade do item. O índice de criticidade de um modo de falha é calculado multiplicando-se a probabilidade de perda da função (obtida de maneira quantitativa – testes, simulações, etc.), a taxa do modo de falha (probabilidade, expressa em fração decimal, que o item irá falhar pelo modo de falha identificado), a taxa de falha do item, pelo tempo de operação do item. A criticidade do item é dada pela somatória dos índices de criticidade dos modos de falhas (UNITED STATES MILITARY STANDARD, 1980)

Para Bertsche (2008), o emprego dos diferentes tipos de FMEA está relacionado com o tipo e complexidade da entidade técnica a ser analisada. Esse autor afirma que os tipos de FMEA mais empregados na indústria são o FMEA de sistema, e DFMEA e o PFMEA. O uso desses três tipos de FMEA é ilustrado na Figura 3.

Em um FMEA de sistema a estrutura do produto é analisada como um sistema composto de elementos (subsistemas e componentes). Assim, é possível identificar relações entre as funções dos elementos.

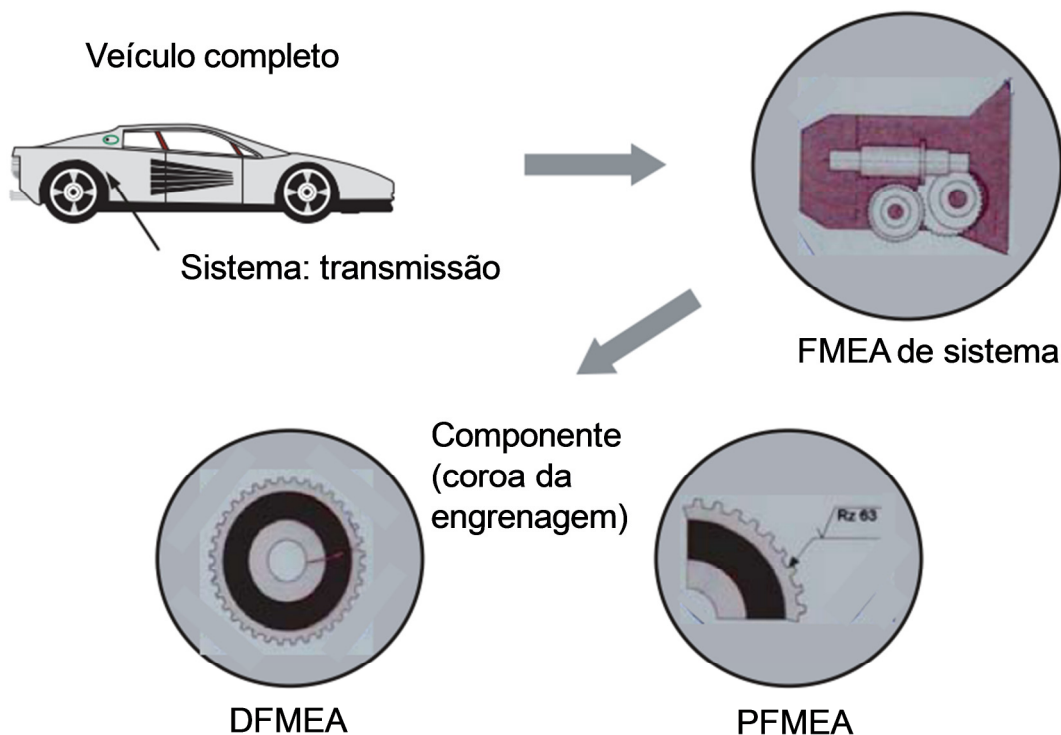


Figura 3 - FMEA de sistema, DFMEA e PFMEA (BERTSCHE, 2008)

Para seguir com a explicação do DFMEA e do PFMEA, é conveniente definir os termos “sistema” e “função”.

Bertsche (2008) define um *sistema* como uma entidade técnica (equipamento, máquina, dispositivo, processo de fabricação, montagem) que:

- exclui ela mesma do ambiente ao redor; portanto, possui contornos, e as interfaces com esses contornos são variáveis de entrada e saída;
- pode ser dividido tanto em sistemas parciais quanto em elementos do sistema;
- pode ser desmembrado em vários níveis hierárquicos;
- pode ser dividido em diferentes tipos de sistemas dependendo do objetivo da análise (por exemplo, em montagem, em grupos funcionais, etc.);
- é uma representação abstrata da descrição do produto.

Já uma *função* descreve a conexão geral e específica entre variáveis de entrada e de saída de sistemas (BERTSCHE, 2008).

Então, no DFMEA são analisadas falhas de funções em diferentes níveis hierárquicos do sistema, na direção de falhas dos sistemas para falhas de componentes (BERTSCHE, 2008). E no PFMEA todas as possíveis falhas do processo de fabricação (manufatura, montagem, transporte, etc.) são observadas. O processo é estruturado de acordo com a descrição do sistema, onde o último nível da estrutura é composto pelos "4M's" (*man, machine, material, método*) e pelo ambiente (BERTSCHE, 2008).

2.1.1 Desenvolvimento histórico

A origem do FMEA não é um consenso. Pentti e Atte (2002) asseveram que o método foi desenvolvido e documentado pela primeira vez no procedimento MIL-P-1629 em 1949 pelo Exército dos Estados Unidos. Anos mais tarde esse procedimento serviu de base para elaboração das normas militares MIL-STD-1629 e MIL-STD-1629A, que continuam sendo usadas até os dias de hoje (PENTTI e ATTE, 2002). Outros autores afirmam que o FMEA emergiu em 1963 de estudos feitos pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), durante o desenvolvimento do projeto Apollo (PUENTE et al., 2002; JOHNSON, K. G. e KHAN, M. K., 2003; CLARKE, 2005; BERTSCHE, 2008; MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009).

Em 1975 o FMEA foi usado no setor nuclear e em 1978 a Ford Company foi a primeira empresa automotiva a integrar o FMEA em seu conceito de garantia da qualidade (CLARKE, 2005). No início da década de 80 as empresas automotivas

que formam a AIAG (*Automotive Industry Action Group*) incorporaram formalmente o FMEA, por meio da norma QS-9000 (atual ISO/TS 16949), em seus processos de desenvolvimento de produtos. Este movimento foi seguido pela indústria automobilística alemã. O procedimento de aplicação do FMEA definido pela VDA (*Verband der Automobilindustrie – German Association of the Automotive Industry*) é o mais usado na Europa (BERTSCHE, 2008).

Atualmente, o FMEA é aplicado em uma variedade de outras áreas, tais como, médica (SPATH, 2003; DUWE, FUCHS e HANSEN-FLASCHEN, 2005; MONTI et al., 2005; CHIOZZA e PONZETTI, 2009; FORD et al., 2009), química e petroquímica (GUIMARÃES e LAPA, 2004; THIVEL, BULTEL e DELPECH, 2008), alimentos (SCIPIONI et al., 2002; SCOTT, WILCOCK e KANETKAR, 2009; TSAROUHAS, ARVANITOYANNIS e AMPATZIS, 2009; TSAROUHAS, ARVANITOYANNIS e VARZAKAS, 2009), desenvolvimento de software (BRAUN et al., 2009; GÖNCZY et al., 2009; KOH e SEONG, 2009), administrativo (RHEE e ISHII, 2003; MILAZZO et al., 2009), etc.

2.1.2 Processo de aplicação

Um pequeno grupo, conhecido como time (ou equipe) de FMEA, formado por especialistas de diferentes disciplinas do ciclo de vida do produto, executa o FMEA em uma ou mais sessões. Em uma sessão de FMEA o fluxo de trabalho é orientado por um formulário padrão. O formulário padrão varia ligeiramente de norma para norma. Não obstante, uma característica comum a todas as normas é que as colunas do formulário são preenchidas sucessivamente uma após a outra da esquerda para a direita. A Figura 4 apresenta um exemplo de formulário FMEA.

Geralmente nos formulários, a primeira coluna é reservada à descrição dos componentes do produto (DFMEA) ou operações de fabricação e suas funções (PFMEA). As próximas colunas referem-se à identificação de modos de falha, seus efeitos e causas. Segue-se para a avaliação dos riscos (severidade do efeito, probabilidade de ocorrência e detecção da causa ou de seu modo). As últimas colunas são reservadas para a proposição de ações de redução de risco e registro dos resultados. Vale ressaltar que um componente pode ter uma ou mais funções e normalmente vários modos de falha. Por sua vez, cada modo de falha pode possuir diversos efeitos e causas.

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

Busca por todos os possíveis/potenciais modos de falha

Busca por todos os possíveis/potenciais efeitos de falha

Busca por todas as possíveis/potenciais causas de falha

Definição/determinação de todos os controles existentes

Proposição de soluções e ações de redução de risco

Registro e avaliação dos resultados

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

Figura 4 - Típico formulário de FMEA, estrutura de árvore e principais informações que são inseridas no formulário (AIAG, 2008; BERTSCHE, 2008)

O formulário de FMEA orienta uma sessão de FMEA. Assim, uma sessão se inicia com a identificação de funções e requisitos de um sistema, subsistema, componente ou etapa de um processo de fabricação, conforme o tipo de FMEA (SFMEA, DFMEA ou PFMEA) (BERTSCHE, 2008).

Em seguida, são determinados todos os modos de falha concebíveis. Essa etapa é fundamental pois cada modo de falha não descoberto pode levar a perigosos efeitos de falha e, portanto, mais tarde, a drásticos problemas de confiabilidade (BERTSCHE, 2008).

Segundo Bertsche (2008), os modos de falha podem ser identificados de diversas maneiras, tais como:

- **estatísticas de falhas** – esta deve ser a primeira opção a ser usada pelo time de FMEA. É fundamental registrar no formulário do FMEA os modos de falha que apareceram em casos semelhantes para se evitar problemas recorrentes;
- **experiência dos participantes da sessão de FMEA** – após serem esgotadas as falhas conhecidas, com a ajuda da experiência dos membros do time de FMEA são derivados modos de falha potenciais;
- **checklists** (listas de modos de falha) – listas de possíveis falhas são frequentemente usadas;
- **métodos de criatividade** (*Brainstorming*, 635, Delphi, etc.) – a utilização de meios criativos para descobrir todos os modos de falha é útil em casos particulares de alto perigo;
- **análise sistemática de árvores de falhas** – o exame de todas as funções junto com sua árvore de falhas é uma abordagem sistemática.

O próximo passo é determinar os efeitos e causas dos modos de falha, e avaliar os riscos. É avaliada a severidade do efeito da falha (índice S), a probabilidade de ocorrência da causa da falha (índice O), e a probabilidade de detecção da causa da falha ou de seu modo (índice D). Na avaliação da severidade, por exemplo, se pessoas são expostas a perigos, o índice de severidade recebe um valor alto, por outro lado, se o efeito for apenas diminuição de conforto, é atribuído um baixo valor. A avaliação da ocorrência refere-se a uma falha hipotética (potencial) ou que já vem ocorrendo no campo. O índice D determina o sucesso na detecção (antes de chegar ao cliente) da causa da falha ou de seu modo. A multiplicação dos três índices ($S \times O \times D$) resulta no índice de risco (RPN – *Risk Priority Number*) (AIAG, 2008).

Cada norma de aplicação do FMEA possui escalas padrão para a atribuição dos valores para os índices de severidade, ocorrência e detecção. As escalas normalmente são de números inteiros de 1 a 10. O valor 1 representa severidade mínima, baixa ocorrência, e detecção muito provável. O valor oposto (10) representa uma avaliação extremamente negativa e baixa confiabilidade do produto (WIRTH et al., 1996).

Na última parte da sessão de FMEA são elaboradas ações de redução de risco. Além dos maiores RPNs, o time de FMEA também deve verificar os valores individuais dos índices. Um valor de severidade $S > 8$ aponta para graves danos

funcionais e também para riscos de segurança. Casos como esse, naturalmente, devem ser analisados com atenção. Um valor de $O > 8$ significa que a falha ocorre muito frequentemente, e naturalmente deve ser otimizado. Falhas podem ser dificilmente detectadas para valores de $D > 8$. Portanto, o dano não é evitado antes que ele chegue ao consumidor (BERTSCHE, 2008). Os exemplos a seguir, retirados do livro professor Bertsche da Universidade de Stuttgart *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering: Determination of Component and System Reliability*, ilustram quatro casos de avaliação de riscos (Tabela 1) e de análises para determinação de ações de melhoria.

Tabela 1 - Casos de avaliação de riscos

Caso	Severidade	Ocorrência	Detecção	RPN
1	10	2	10	200
2	5	10	2	100
3	3	10	5	150
4	1	1	1	1

- **Análise caso 1:** Uma causa isolada de falha potencial de maneira alguma será detectada após sua ocorrência e um efeito de falha extremamente severo chega às mãos do cliente. Para este caso, existe a necessidade de ação, mesmo se o valor do RPN for considerado baixo (considerando que, com a escala usada no exemplo, o RPN pode assumir valores entre 1 a 1000).
- **Análise caso 2:** Uma causa de falha potencial ocorrendo frequentemente leva a um efeito moderadamente severo sob o ponto de vista do cliente. A ocorrência da causa da falha não é sempre detectada e, portanto, atinge as mãos do cliente de tempos em tempos. Aqui, é apropriado se introduzir ações de prevenção, e quando adequado, estas ações podem substituir as ações de detecção que estão implementadas.
- **Análise caso 3:** Uma causa de falha potencial, que frequentemente ocorre, não sempre detectada, leva uma falha relativamente insignificante às mãos do cliente. No entanto, tal condição resulta em reclamações de clientes e deve ser melhorada com ações apropriadas de otimização.
- **Análise caso 4:** Uma causa de falha altamente improvável que ocorra, poderia levar a um efeito de falha insignificante às mãos do cliente, se ela ocorresse. Contudo, é altamente provável que a causa da falha seja detectada. No caso

dessa avaliação, é razoável verificar as ações de detecção implementadas, e se necessário reduzi-las se forem muito caras.

As novas ações de melhoria são registradas no formulário do FMEA, responsáveis e prazos para implementação são estabelecidos, e a sessão de FMEA é encerrada.

Posteriormente à implementação das ações, em uma nova reunião, são atribuídos novos valores para os índices S, O, e D e calculado um novo valor para o RPN.

A Figura 5 de Rozenfeld et al. (2006) ilustra as informações do formulário FMEA em uma visão estrutural.

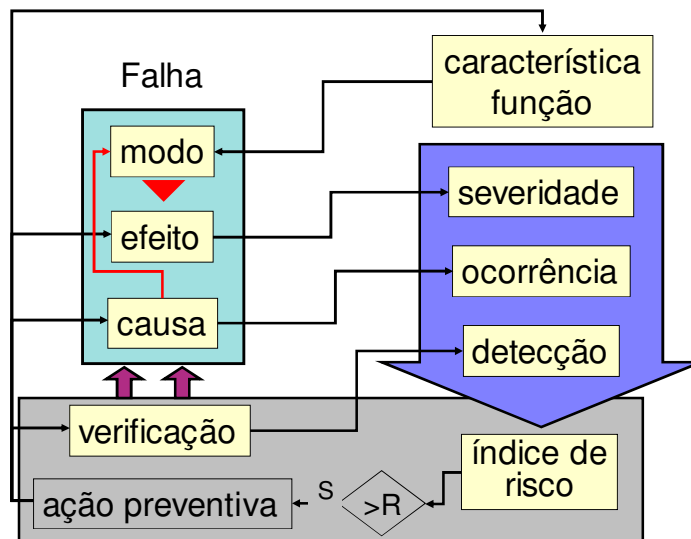


Figura 5 - Visão estrutural das informações do FMEA (ROZENFELD et al., 2006)

2.1.3 Times

A execução de um FMEA é realizada em uma ou mais sessões por times multidisciplinares (Figura 6), os times de FMEA. Essa abordagem permite que todas as áreas funcionais da empresa afetadas pela análise sejam envolvidas (AIAG, 2008). Em prática tem sido demonstrado que a execução do FMEA sob a direção de um facilitador, familiar com o procedimento metodológico, é benéfica, no sentido se evitar discussões referentes ao procedimento de execução do método (BERTSCHE, 2008).



Figura 6 - Time de FMEA composto de colaboradores da área de Projeto, Planejamento da produção, Produção, Vendas, Suprimentos, Qualidade, Teste e Manufatura

Em geral, o time de FMEA consiste de um facilitador, que oferece conhecimento metodológico, e membros que oferecem conhecimentos técnicos diversos referentes ao produto ou processo a ser analisado (STAMATIS, 1995). O facilitador, que também pode possuir um pequeno conhecimento do produto ou processo, certifica que os membros do time adquiram conhecimento básico da metodologia antes das sessões de análise (MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009). Para isso, um treinamento rápido no início de uma sessão pode ser útil (BERTSCHE, 2008).

O tamanho do time depende da complexidade do item e do porte da organização. (AIAG, 2008). Pode variar entre 4 – 6 membros. Se menos de 3 – 4 pessoas estiverem na sessão de análise, corre-se o risco de questões importantes serem deixadas de lado ou abordadas inadequadamente. Por outro lado, se o time consistir de mais de 7 – 8 membros, a dinâmica das discussões do grupo poderia ser enfraquecida por falta de integração entre os membros do time, conduzindo, inevitavelmente, a aborrecimentos nas reuniões de FMEA (LEVIN e KALAL, 2003; BERTSCHE, 2008). A quarta edição do manual de aplicação do FMEA da AIAG (2008) prescreve que um time não necessita ter todos os membros com experiência relevante, mas sim com tempo disponível e autoridade sancionada pela gerência.

Em certos casos, pode ser interessante ter membros do time com diferentes níveis de familiaridade com o produto ou processo. Aqueles que possuem maior familiaridade terão valiosos *insights*, mas talvez não notem problemas potenciais óbvios. Já aqueles que são menos familiar com o produto ou processo trarão ideias objetivas e imparciais (MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009).

Deve-se atentar ao fato de que colaboradores experientes que têm investimento emocional no produto ou processo talvez fiquem demasiadamente sensíveis durante o processo de crítica e se tornem defensivos. Devem-se pesar as vantagens e desvantagens que o conhecimento e experiência deles podem trazer para a discussão antes de incluir ou não esses colaboradores no time (LEVIN e KALAL, 2003).

2.2. DRBFM – Design Review Based on Failure Mode

Como foi explanado na introdução desta dissertação (item 1.1) a maioria dos novos produtos em engenharia é projetada por meio de modificações de produtos existentes (GERST et al., 2001; CLARKSON, SIMONS e ECKERT, 2004), e mudanças podem criar um incremento de falhas potenciais no produto (CHAO e ISHII, 2007; SCHMITT et al., 2007), causando problemas de confiabilidade.

Percebendo que existe uma relação entre modificações no produto e novas falhas e, que nem sempre os engenheiros percebem todos os possíveis riscos de falhas devido às mudanças, a *Toyota Motor Corporation* desenvolveu um método, baseado no FMEA, para tornar visíveis todos os problemas latentes e assegurar que as medidas necessárias para corrigir estes problemas sejam todas implementadas. Esse método é parte de sua filosofia *Mizen Boushi* (traduzido por “medidas de prevenção”), e foi chamado de *Design Review Based on Failure Mode* (DRBFM) – Revisão de Projeto baseada em Modos de Falha.

A filosofia *Mizen Boushi* é chamada de GD³ (Cubo GD). GD³ é abreviação para: *Good Design* (bom projeto), *Good Discussion* (boa discussão do projeto) e *Good Dissection* (boa revisão dos resultados) (SCHORN e KAPUST, 2005). O primeiro elemento (*Good Design*) consiste no uso do máximo número possível de componentes resistentes, dando o conceito de robustez (SCHMITT et al., 2007). *Good Design* também preza pelo número mínimo de mudanças no produto para reduzir a complexidade da prevenção do erro (SCHMITT et al., 2007). Os outros dois elementos, *Good Discussion* e *Good Dissection*, referem-se a uma cuidadosa e sistemática análise de todas as mudanças e seus efeitos no produto, acompanhado de adequadas medições e discussões criativas de um time multidisciplinar (SCHMITT et al., 2007).

O DRBFM é utilizado na filosofia *Mizen Boushi* para identificar, o mais cedo possível durante o desenvolvimento do produto, qualquer problema causado por

modificações no projeto (*design*) (mudanças intencionais) e mudanças nas condições de uso (mudanças acidentais) (SHIMIZU, IMAGAWA e NOGUCHI, 2003).

2.2.1 Desenvolvimento histórico

Da mesma maneira que aconteceu com o *Toyota Production System (Lean Manufacturing)*, muitos autores começaram a escrever sobre o *Toyota Product Development System (Lean Design)*. Desde que essas publicações entraram na comunidade científica, com os artigos nas revistas *Harvard Business Review* (SOBEK, LIKER e WARD, 1998) e *Sloan Management Review* (WARD et al., 1995), empresas das mais variadas atividades começaram a aplicar o *Lean Design* em conjunto com seus sistemas *Lean Manufacturing*.

Diversos trabalhos foram conduzidos na tentativa de decodificar o sistema Toyota de desenvolvimento de produtos. Os pesquisadores Morgan e Liker (MORGAN, 2002; MORGAN e LIKER, 2006) da Universidade de Michigan, por exemplo, conduziram centenas de horas de entrevistas com engenheiros de desenvolvimento da Toyota no Japão e nos Estados Unidos, procurando responder a pergunta “Quais são os princípios que têm feito a Toyota ser tão bem-sucedida?” (MORGAN e LIKER, 2006).

Porém, esses pesquisadores não citam em suas publicações o método DRBFM. No livro “*The Toyota Product Development System: Integrating People, Process and Technology*” (2006) Morgan e Liker dedicaram à filosofia *Mizen Boushi* um parágrafo, mas não citaram o DRBFM.

De acordo com Schorn (2005) o método DRBFM foi desenvolvido na *Toyota Motor Corporation* por Tatsuhiro Yoshimura, o qual foi, por 32 anos, responsável pela engenharia de confiabilidade na Toyota. Para Schorn (2005), Yoshimura dedicou uma grande parte da sua vida profissional à tarefa de evitar problemas antes mesmo de eles aparecerem. Schorn (2005) relata que o próprio Yoshimura admite que, diante desta tarefa, esteve relativamente sozinho com muita frequência, e seus colegas de trabalho da Toyota que agiam de maneira “*Troubleshooter*” eram aparentemente os heróis da empresa: afinal eles resolviam os problemas assim que estes apareciam (SCHORN, 2005). Schorn (2005) comenta que o resumo de Yoshimura sobre essa experiência é similar ao resultado de um estudo do MIT: “*Nobody Ever Gets Credit for Fixing Problems that Never Happened*” (REPENNING e STERMAN, 2001).

O que é observado é que o método DRBFM vem sendo estudado de maneira restrita pela comunidade científica e tem ganhado importância na indústria automotiva. O professor Hiroshi Noguchi da universidade Kyushu no Japão, juntamente com engenheiros da Toyota, publicaram quatro artigos sobre o método DRBFM sendo que três deles no idioma japonês (SHIMIZU e YOSHIMURA, 2004; SHIMIZU e NOGUCHI, 2005; SHIMIZU, OTSUKA e NOGUCHI, 2007) e um no idioma inglês (SHIMIZU, IMAGAWA e NOGUCHI, 2003). A quarta edição do manual de aplicação do FMEA elaborado pela AIAG em 2008 apresenta, no apêndice D, junto como o FMECA (*Failure Mode, Effect and Criticality Analysis*) e o FTA, o DRBFM como técnica alternativa de análise.

Também foi notado, que o Departamento de Metrologia e Gestão da Qualidade da Universidade Técnica de Aachen (em alemão: *Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen - RWTH Aachen* na Alemanha trabalha em parceria com empresas de diferentes áreas a fim de estabelecer uma filosofia chamada *Mizen Boushi* na Alemanha. Posteriormente, a difusão do desenvolvimento da estratégia para a implementação de DRBFM baseado nos resultados obtidos nessas empresas, ocorre em workshops interdisciplinares (SCHMITT, KOHLMANN e HAMMERS, 2008). Os autores alemães (SCHMITT, KRIPPNER e BETZOLD, 2006), afirmam que as primeiras experiências mostraram que a implementação, além de trazer melhoria na confiabilidade, traz também aspectos positivos para a estrutura e processos da organização. Mais informações podem ser encontradas no *website* (em alemão): www.drbfm.com.

2.2.2 Processo de aplicação

O processo de aplicação do DRBFM é dividido em duas fases: a fase de análise das mudanças e a fase Revisão de Projeto (*design review*) (GM, 2005). A fase de análise é realizada individualmente pelo engenheiro responsável pelo *design* (projeto). A fase de revisão de projeto são sessões (encontros) nas quais, um time multidisciplinar de especialistas, se reúne para revisar as análises da primeira fase e propor ações que evitem a ocorrência de falhas decorrentes das modificações. Nos parágrafos seguintes serão detalhadas essas duas fases.

Na primeira fase é feita uma análise inicial das mudanças propostas. São usadas duas ferramentas de apoio: um *checklist* de mudanças e uma tabela de comparação entre a construção/item anterior e o atual (ALLAN, 2009). O *checklist*

tornar visíveis todas as mudanças intencionais ou nas condições de uso (veja um exemplo de *checklist* de mudanças no Quadro 1). A tabela de comparação é elaborada baseando-se no *checklist*. Na tabela são descritos os detalhes das mudanças e como era a construção (item de análise/componente) anteriormente às mudanças (veja um exemplo de formato de tabela de comparação no Quadro 2). Então é possível evitar qualquer omissão que possa resultar em problemas de funcionalidade do produto (SCHMITT, KOHLMANN e HAMMERS, 2008).

Palavra-chave da mudança		Mudança intencional	Mudança incidental
Especificações		()	()
Funções		()	()
Desempenho		()	()
Condições de uso	Temperatura	()	()
	Umidade	()	()
	Vibração	()	()
	Fornecimento de energia	()	()
	Ruído	()	()
	Ondas de rádio	()	()
	Iluminação	()	()
	Som	()	()
	Água	()	()
	Carregamento	()	()
Sistema (itens periféricos)		()	()
Construção		()	()
Forma		()	()
Circuito		()	()
Software		()	()
Componente		()	()
Material		()	()
Tratamento		()	()
Montagem		()	()
Equipamento		()	()
Fornecedor		()	()
Fonte do material		()	()
Local de produção		()	()

Quadro 1 - Checklist para se identificar mudanças (ALLAN, 2009)

Nome do componente	Palavra-chave da mudança	Detalhes das mudanças		Considerações
		Construção anterior	Nova construção	

Quadro 2 - Exemplo de tabela de comparação (SHIMIZU, OTSUKA e NOGUCHI, 2007)

Os dados da análise inicial são documentados no formulário DRBFM (veja um exemplo de formulário DRBFM no Quadro 3).

Nome do item / mudanças	Função	Pontos preocupantes devido às mudanças (modos de falha)		Quando e Como os pontos preocupantes aparecem		Efeito para o cliente	Importância
		Modos de falha devido às mudanças	Alguma outra preocupação? (DRBFM)	Causa raiz / causa dominante	Alguma outra consideração para causa? (DRBFM)		

Atuais medidas de projeto (<i>design</i>) para evitar preocupações (incluindo regras/normas de projeto, <i>checklists</i> , etc.)	Ações recomendadas (Resultados do DRBFM)						Result. das ações
	Ações relacionadas ao " <i>Design</i> "	Resp. & Prazo	Ações relacionadas à " <i>Avaliação</i> "	Resp. & Prazo	Ações relacionadas ao " <i>Processo de fabricação</i> "	Resp. & Prazo	

Quadro 3 - Exemplo de formulário DRBFM (SHIMIZU, IMAGAWA e NOGUCHI, 2003)

Nas duas primeiras colunas do formulário são registrados o nome do item em análise e as justificativas para as mudanças. Então, na segunda coluna são listadas as funções (básicas e adicionais) e características do item. Se as características já tiverem sido especificadas, elas são listadas quantitativamente (SCHMITT, KOHLMANN e HAMMERS, 2008).

Em posse das mudanças e das funções, são identificados os modos de falha potencial (chamados de "pontos preocupantes" – *concern points*) devidos às mudanças, ou seja, como as funções são afetadas negativamente na perspectiva do cliente (perda da função ou valor para o cliente). Como ferramenta de apoio para essa identificação, é elaborada uma matriz que relaciona funções e mudanças

(SHIMIZU, IMAGAWA e NOGUCHI, 2003). Nessa matriz são indicadas quais funções são afetadas por quais mudanças, sendo possível prever todos os modos de falhas das funções. Veja um exemplo ilustrativo dessa matriz no Quadro 4. Nesse exemplo, o “X” indica a existência de interação.

Funções Modificações	Função 1	Função 2	Função 3	Função n
Modificação 1		X	X	
Modificação 2	X		X	
Modificação 3		X		
Modificação n				

Quadro 4 - Exemplo ilustrativo de uma matriz que relaciona funções e mudanças

Em seguida, são identificadas as causas raiz/dominantes dos modos de falhas potenciais, isto é, quando e como os pontos preocupantes identificados aparecem. Para apoiar a identificação das causas raiz são usadas as técnicas 5x”Why” (Five times “Why”), *Fault Tree Analysis* (FTA) ou Diagrama de causa-efeito (Diagrama de Ishikawa, espinha de peixe) (SHIMIZU, IMAGAWA e NOGUCHI, 2003). Após a identificação das causas raiz, elas são registradas no formulário do DRBFM de maneira organizada e mais quantitativa possível.

Posteriormente, são listados no formulário os efeitos (impactos) potenciais para o cliente (próximo componente, subsistema, sistema, processo de fabricação, usuário final, etc). A importância desses efeitos para o cliente é avaliada em uma escala A, B e C, sendo A o mais importante (SHIMIZU, IMAGAWA e NOGUCHI, 2003).

Finalmente, são listadas no formulário as medidas de projeto (*design*) comprometidas a eliminar os pontos preocupantes. Essas medidas incluem regras/normas de projeto, *checklists*, etc..

Todas as informações registradas no formulário DRBFM são revisadas por especialistas na fase de Revisão de Projeto. As Revisões de Projeto são conduzidas pelo engenheiro responsável. O engenheiro convoca um time de especialistas de diversas áreas para as revisões de projeto e prepara todo material necessário (GM, 2005).

Em uma revisão de projeto do DRBFM, primeiramente, o engenheiro responsável explica em detalhes as modificações intencionais e incidentais, funções, pontos preocupantes, efeitos para o cliente e as atuais medidas para eliminar os

pontos preocupantes, referentes ao item em análise (GM, 2005). Então o time de especialistas revisa, analisa e discute detalhadamente cada resultado da primeira fase (GM, 2005). Com esse procedimento é possível identificar quaisquer outros modos de falha não considerados pelo engenheiro de projeto, determinar quaisquer outros efeitos criados pelos modos de falha, determinar quaisquer causas potenciais adicionais dos modos de falha (SHIMIZU, IMAGAWA e NOGUCHI, 2003). Os resultados da discussão são registrados no formulário de DRBFM.

Por fim, o time desenvolve ações para prevenir que as falhas encontradas ocorram. São recomendadas ações, referentes ao Projeto, à Avaliação e à Produção, para eliminar/mitigar as causas ou os modos de falha; e são determinados os responsáveis e os prazos de implementação para cada ação recomendada (SHIMIZU, IMAGAWA e NOGUCHI, 2003).

Estas são as duas fases do DRBFM. Conforme as ações recomendadas são executadas, os resultados são documentados no formulário DRBFM pelo engenheiro responsável. O formulário é consultado sempre que houverem novas mudanças.

2.3. FTA – Fault Tree Analysis

Uma árvore de falha é uma representação gráfica de relações lógicas entre eventos de falhas, onde o evento topo é ramificado em eventos contribuintes por meio da análise de causa-efeito (YANG, 2007). A Análise da Árvore de Falhas (FTA – *Fault Tree Analysis*) é um procedimento estruturado para a identificação de causas externas e internas, as quais se ocorrerem pela sua combinação, podem levar o produto a um determinado estado (na maioria das vezes um estado de falha). Assim o FTA determina o comportamento de um sistema em consideração a certo evento e/ou falha (VESELY et al., 1981).

São usados símbolos lógicos padronizados (Figura 7), comumente encontrados em fluxogramas para representar uma sequência de eventos. As saídas do FTA promovem um melhor entendimento de causas que podem levar a um modo de falha (LEVIN e KALAL, 2003). Sendo assim, sua aplicação é especialmente útil nas fases iniciais do desenvolvimento de produtos (BERTSCHE, 2008).

O FTA se inicia com um evento topo e procede por todas as causas conhecidas e possíveis que podem conduzir à ocorrência do evento topo. Devido à natureza de sua abordagem *top-down*, o FTA tem sido amplamente usado na determinação de causas de modos de falhas (YANG, 2007).


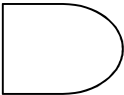
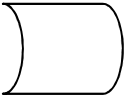
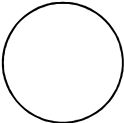
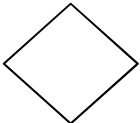
Retângulo		Descreve eventos (falhas)
Conector “E”		Representa uma falha de saída se todas as entradas existirem ao mesmo tempo
Conector “OU”		Representa uma saída se existirem qualquer uma das entradas
Círculo		Descreve uma causa raiz potencial que não pode ser dividida (este é o nível mais baixo de abstração)
Losango		Descreve uma falha que não pode ser corrigida pelo time

Figura 7 - Símbolos lógicos do FTA (LEVIN e KALAL, 2003)

A Análise da Árvore de Falhas pode ser conduzida qualitativamente e quantitativamente. Neste trabalho será abordada somente a análise qualitativa, pois análises quantitativas de probabilidade de ocorrência de causas de falhas estão fora do escopo do trabalho.

2.3.1 Desenvolvimento histórico

O método Análise da Árvore de Falhas surgiu na indústria aeroespacial americana no início da década de 60 (ERICSON, 1999; LAMBERT, 2003). Ele foi desenvolvido por H. A. Watson (Laboratórios Bell) para a força aérea dos Estados Unidos (ERICSON, 1999; BERTSCHE, 2008) analisar eventos indesejados associados com sistemas balísticos de mísseis, tais como, “falha no lançamento de míssil quando solicitado” e “lançamento inadvertido” (LAMBERT, 2003).

A utilidade do FTA foi reconhecida pelo governo americano e outras agências governamentais, além da militar, e indústrias adotaram seu uso (LAMBERT, 2003).

A empresa Boeing foi a primeira empresa comercial que notou os benefícios do método e começou a usá-lo (1966) no desenvolvimento de aeronaves comerciais (ERICSON, 1999). Até a década de 70 o FTA foi usado em sistemas críticos de segurança tais como em equipamentos militares e de aviação. Nos anos 70 o FTA passou a ser usado na área de energia nuclear (BERTSCHE, 2008), e no início da década de 80 a Comissão Americana Reguladora Nuclear (*U.S. Nuclear Regulatory*

Commission) publicou o *Fault Tree Handbook* (VESELY et al., 1981), o qual de certa maneira, padronizou, facilitou e promoveu o uso do FTA (YANG, 2007).

Hoje em dia, o FTA é aplicado no desenvolvimento de muitos produtos comerciais em análises de causa-efeito. Comumente ele é aplicado em conjunto com o FMEA para melhorar a identificação de mecanismos para modos de falha que causam efeitos de falha. Sua aplicação pode ser facilitada pelo uso de pacotes de softwares comerciais tais como Relex, Isograph, e Item (YANG, 2007).

2.3.2 Processo de aplicação

Para se determinar o comportamento da falha de um sistema e/ou de elementos do sistema juntamente com suas conexões, o evento indesejado do sistema (evento topo - *TOP*) é primeiramente definido. No próximo passo são analisadas possíveis falhas do próximo nível inferior do sistema e como elas poderiam ser conectadas com a falha superior. Este processo é repetido até o nível mais baixo do sistema ser atingido. O nível mais baixo (*DOWN*) corresponde aos possíveis modos de falha (VESELY et al., 1981; LEVIN e KALAL, 2003; BERTSCHE, 2008).

As Figuras 8 e 9 mostram respectivamente o procedimento básico e os passos para a elaboração de uma árvore de falhas.

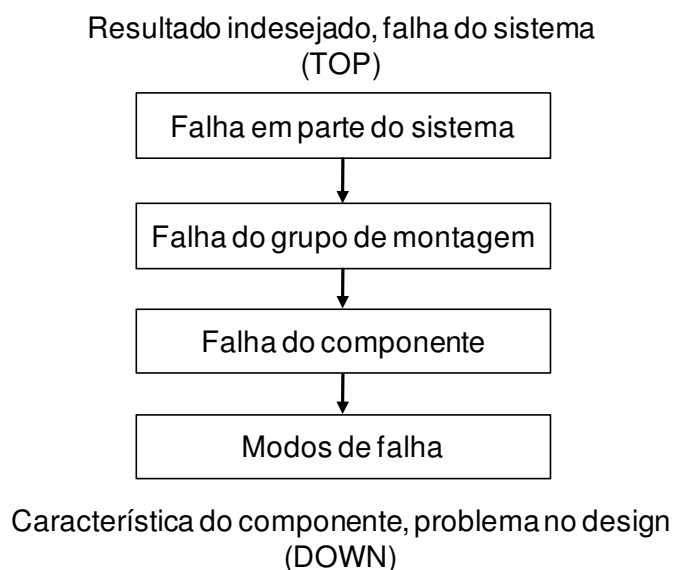


Figura 8 - Procedimento básico para a estruturação de uma árvore de falhas (BERTSCHE, 2008)

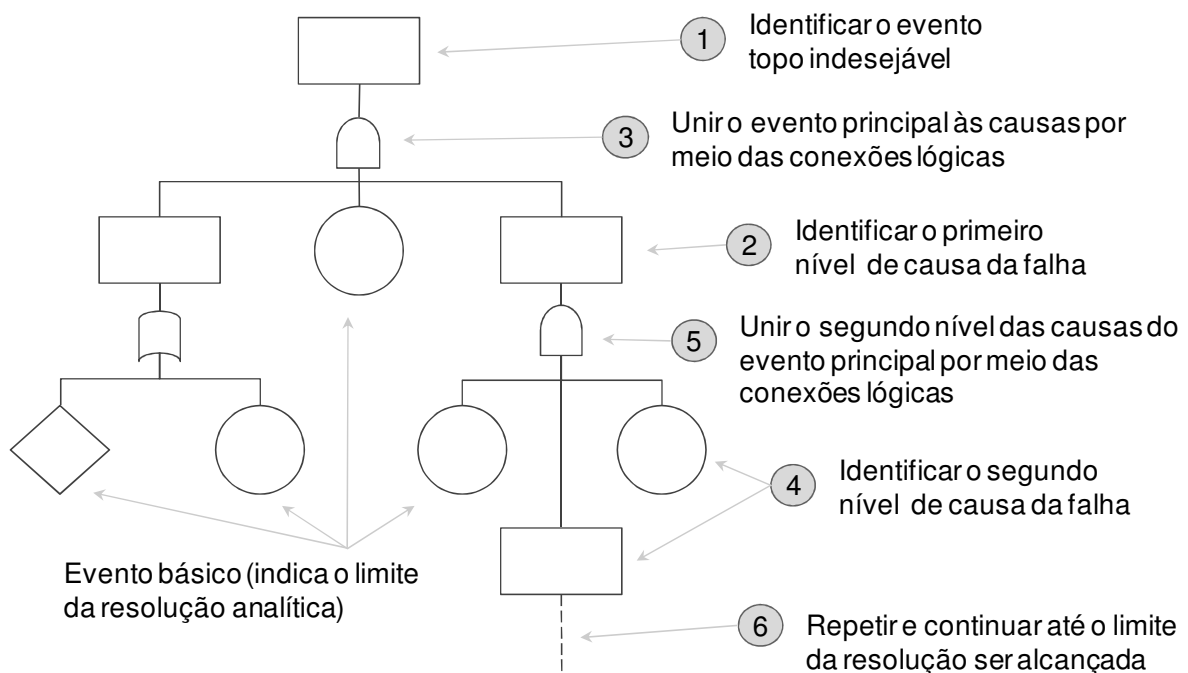


Figura 9 - Etapas da construção da árvore de falhas (CLEMENS, 2002)

2.4. Comparação entre os métodos de análise de falha

2.4.1 FTA e FMEA

Para Bertsche (2008), a principal diferença entre os dois métodos é que o FMEA é um método indutivo e o FTA é um método dedutivo. A indução constitui a racionalização de casos individuais para uma conclusão geral. Se, na consideração de certo sistema, é postulada uma falha ou condição e tenta-se descobrir o efeito da falha ou condição na operação do sistema, está se construindo uma análise indutiva do sistema. Já a dedução constitui a racionalização do geral para o específico. Em uma análise dedutiva de um sistema, postula-se que o sistema falha de certa maneira, e tenta-se achar quais modos do comportamento do sistema, subsistema ou componente contribuíram para a falha (VESELY et al., 1981).

Vesely et al. (1981) se referem à abordagem dedutiva como uma abordagem “*Sherlock Holmesian*”, pois o detetive Holmes, face às dadas evidências, tem a tarefa de reconstruir os eventos que culminam no crime. Os autores afirmam que investigações de acidentes são análises dedutivas. Por exemplo, pergunta-se: quais cadeias de eventos causaram o naufrágio de um barco “a prova de afundamento” como o Titanic?; ou quais falhas de processos, instrumentos e/ou humana, contribuíram para a queda de uma aeronave comercial?

Assim, na análise indutiva do FMEA são examinados os efeitos de um modo de falha de um componente sobre um sistema. Ao contrário, na análise dedutiva do FTA, é delineado o caminho da falha, partindo do efeito no sistema até a causa de falha no componente (BERTSCHE, 2008).

O FMEA e o FTA são métodos diferentes para uma situação similar. Comparando os dois, Bertsche (2008) faz as considerações apresentadas na Tabela 2 e na Figura 10.

Tabela 2 - Comparação das características do FMEA e do FTA

FMEA	FTA
Combina as questões “Qual é a causa?” e “Quais são os efeitos da falha?”	A determinação de falhas no FTA pode ser facilitada com um FMEA predecessor
Não é tão sistemático quanto o FTA	Busca sistemática de causas para um evento e/ou falha
Avalia o risco de uma falha pela combinação das duas questões e define ações preventivas dependendo do risco potencial	Usa as combinações AND e OR para ligar cadeias de eventos
Examina falhas não combinadas e deixa de lado níveis intermediários	Examina falhas combinadas que podem levar a um evento em outro nível

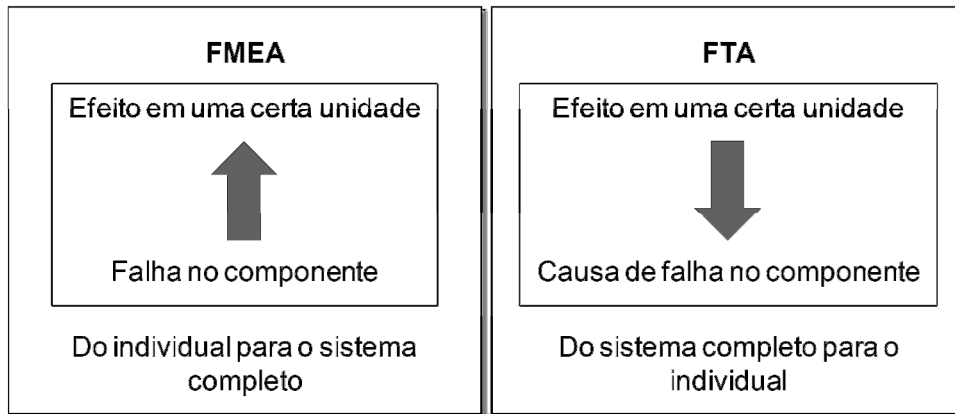


Figura 10 - Comparação entre o FMEA e o FTA

Resumindo, o método FMEA é aplicado para se determinar quais falhas no sistema são possíveis; e o método FTA é aplicado para se determinar como uma dada falha no sistema pode ocorrer (VESELY et al., 1981).

2.4.2 FMEA e DRBFM

Os dois métodos FMEA e DRBFM são aplicados durante o processo de desenvolvimento de produto na antecipação de falhas. O FMEA é aplicado em itens novos para a empresa e o DRBFM nos itens modificados. O DRBFM utiliza os

resultados do FMEA, e os resultados do DRBFM, por sua vez, podem ser incorporados no FMEA novamente.

O FMEA é usado para se descobrirem correlações entre funções e falhas, avaliar os riscos e determinar ações de melhoria. Sua aplicação é realizada em sessões de FMEA, que podem acontecer durante todo ciclo de vida do produto.

Já o DRBFM, é usado para analisar mudanças (de projeto ou condições de uso) em projetos estabelecidos (*proven designs*) e também para determinar ações de melhoria. O DRBFM analisa profundamente as falhas para certos itens de grande risco, utilizando a técnica dos cinco porquês (*5xWhy*) e números, dados e fatos. Sua aplicação é permanente nas atividades diárias dos engenheiros e em revisões de projeto, realizadas por um grupo de especialistas.

Na literatura foi encontrado apenas um artigo que descreve a relação do FMEA com o DRBFM. O autor do artigo, Allan (2009), descreve como o DRBFM e a técnica “análise dos pontos modificados” são aplicados na Delphi *Thermal Systems*. A autora explica que para um caso de um projeto (*design*) de produto totalmente novo (caso 1), a antecipação de falhas inicia-se com a aplicação do DFMEA, para se estabelecer padrões/regras de projeto (*design guides/standards*). Por outro lado, para um caso de um projeto de produto próxima geração ou incremental (caso 2), a antecipação de falhas começa com o DRBFM e atualiza os padrões/regras de projeto.

2.5. Softwares comerciais para realização do FMEA e do DRBFM

Existe grande quantidade de softwares comerciais de apoio à realização do FMEA disponíveis no mercado. A Tabela 3 apresenta os nomes de alguns deles, respectivos desenvolvedores e *website*.

Neste item, são apresentadas as principais funcionalidades e benefícios dos softwares IQ-FMEA da empresa APIS e Xfmea da empresa ReliaSoft. Esses dois softwares foram escolhidos pois possuem a funcionalidade de realizar o DRBFM, além do DFMEA/PFMEA.

O material de marketing e manuais de aplicação do IQ-FMEA e do Xfmea foram analisados, com o objetivo de levantar as funcionalidades e benefícios dos dois softwares. Além dessa pesquisa documental, foram adquiridas licenças educacionais dos softwares, permitindo realizar uma análise mais acurada. O

resumo das funcionalidades e benefícios dos dois softwares é apresentado nas subseções a seguir.

Tabela 3 - Softwares comerciais de FMEA

Software	Desenvolvedor	Website
Byteworx FMEA	Byteworx	http://www.byteworx.com/
CIMOS FMEA	MBFG	http://www.irmler.com/
FMEA	Heron Technologies	http://www.heron-technologies.com/
FMEA Executive	Symphony Technologies	http://www.symphonytech.com/
FMEA Facilitator	Kinetic	http://www.fmeca.com/
FMEA-Pro	Dyadem International	www.dyadem.com
FMEA Xpert	Elcomind	www.elcomind.it
IQ-FMEA / IQ-RM	APIS	www.apis.de
Easy-FMEA Evaluation	Retriever Technology	www.reetec.co.uk
RiskSpectrum FMEA	Scandpower	http://www.scandpower.com/
SCIO-FMEA	PLATO	www.plato-ag.de
TDC FMEA	TDC	www.tdc.fr
Byteworx FMEA	Byteworx	www.byteworx.com

2.5.1 IQ-FMEA - APIS

APIS informationstechnologien GmbH é uma empresa alemã que está no mercado desde 1992. Seus produtos são softwares para gerenciar riscos técnicos com base em conhecimentos.

A família de softwares APIS-IQ-Software (IQ = *Integrated Quality*) é composta dos softwares **IQ-FMEA**, IQ-FMEA-L, IQ-FMEA PRO, IQ-RM, e IQ-RM PRO. A diferença entre eles é a presença ou ausência de certas funcionalidades, no entanto, grande parte delas está presente em todos os softwares da família.

Os softwares da APIS-IQ-Software têm como objetivo apoiar usuários que trabalham no escopo do Gerenciamento de Riscos (FMEA, Diagrama de Fluxo do Processo, Plano de Controle). Eles possibilitam gerenciar dados de maneira consistente e eficiente, sem redundâncias, ou seja, possíveis mudanças nos documentos podem ser feitas sem necessidade de ajustes adicionais em outros documentos.

Esses softwares, desenvolvidos para serem usados em ambiente Windows, oferecem uma base de segurança para integrar o fluxo de trabalho e sistemas de gestão de documentos.

Com esses softwares podem ser criados diversos documentos, tais como, formulários DFMEA/PFMEA/DRBFM, diagramas de fluxo de processo (apenas IQ-RM e IQ-RM PRO), planos de controle (apenas IQ-RM e IQ-RM PRO), planos de prazo e avaliações estatísticas. O formato em que os documentos são apresentados pode ser modificado para atender as normas ISO/TS 16949⁴, VDA 4.2 (*Verband der Automobilindustrie*), AIAG FMEA (4th edition) (*Automotive Industry Action Group*), IEC 61508 e ISO CD 26262.

Outros documentos, além dos citados, úteis para a análise do FMEA, podem ser compilados. Alguns exemplos são: redes de funções, redes de falhas, diagrama de causas e efeitos e árvore de falhas.

A seguir é apresentada uma lista de funcionalidades do IQ-FMEA:

- Estruturas de sistemas: representa a estrutura do sistema em forma de árvore, sendo que a árvore mostra como o sistema completo pode ser dividido em subsistemas e assim as análises de falhas e funções podem ser realizadas. Na Figura 11 é mostrada a tela do IQ-FMEA com um exemplo de uma estrutura de sistema.

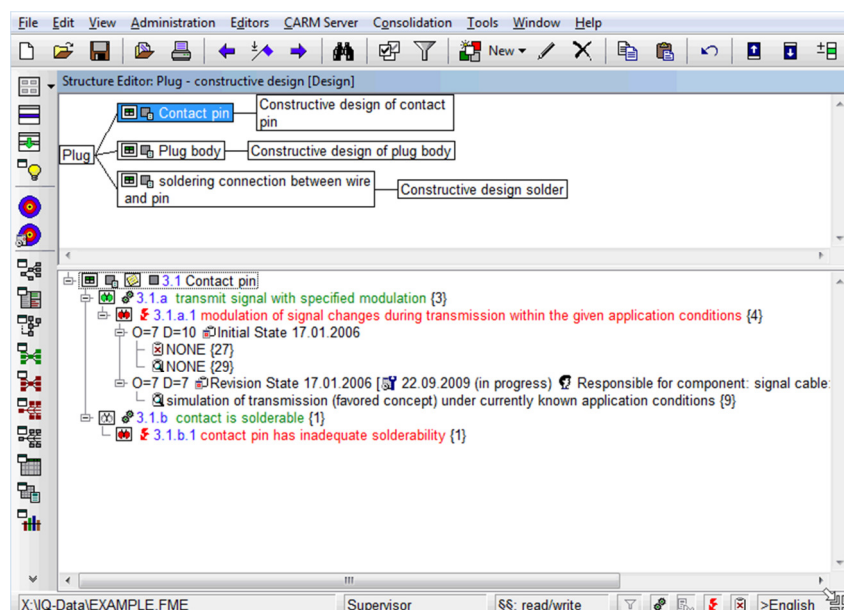


Figura 11 - Tela de um exemplo de estrutura de sistemas

⁴ A ISO/TS 16949 é um padrão internacional para sistemas de gestão da qualidade, mais especificamente para a indústria automotiva e tem como base a norma ISO 9000.

- Rede de funções: As informações de causa e efeito de uma estrutura ou função do projeto são armazenadas na forma de rede.
- Rede de falhas: As informações de causa e efeito de uma estrutura ou o fracasso do projeto são armazenadas na rede falha.
- FTA e Diagrama de causa e efeito: ambos podem ser realizados por meio das informações provenientes da rede de falhas e funções.
- Matriz do FMEA: representa todas as entradas e saídas da análise do FMEA, sempre seguindo normas internacionais, como VDA, AIAG, MIL, etc.. O software permite que comentários e gráficos sejam visualizados junto à matriz. A Figura 12 apresenta a matriz do FMEA em conjunto com um gráfico Pareto de Causas x RPNs.

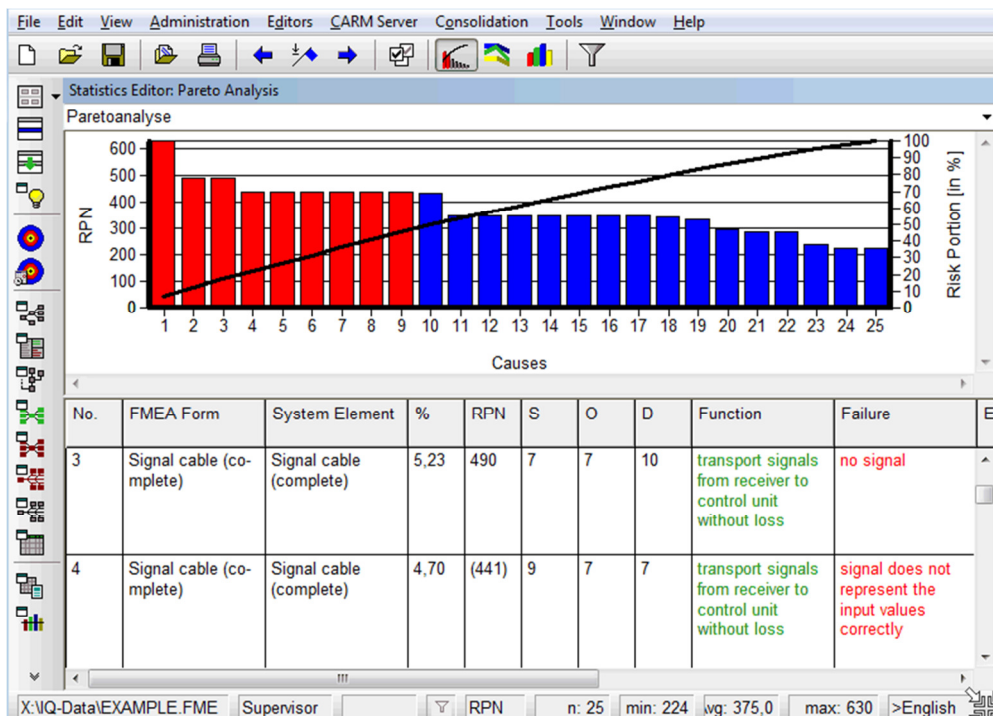


Figura 12 - Matriz do FMEA e exemplo de um gráfico de Pareto

- Acompanhamento de ações: enumera o responsável, a data e qualquer informação adicional para cada ação. Esta funcionalidade auxilia no gerenciamento de projetos. A Figura 13 apresenta um *printscreen* da planilha de acompanhamento de ações.

The screenshot shows the 'Deadline Editor' window for 'CC 2042 - manufacture signal cable [Process]'. The table contains the following data:

Active Ac-	Detection Action	Date	Status	Responsibility	RPN	RPN initial	RPN Now
atically proof-of-label at appliance	check bill of materials and verify with recorded test results	19.05.2009	in progress	Bonewski, Hans, D-PT, Entwicklung	(72)	225	225
	checking and clearing of process by shift supervisor	17.03.2009	in progress	Hehre, Claudia, FV-PO, Prozessplanung	(225)	270	270
	record in process documentation and checking by			Shift supervisor	RPN	RPN	RPN

Figura 13 - Planilha de acompanhamento de ações

- Avaliação estatística: fornece números e diagramas com base nesses números, a fim de ser capaz de avaliar os riscos em um sistema. Existem diferentes opções de análise disponíveis, tais como Análise de Pareto, análise de frequência, Matriz de riscos, entre outras.
- IQ-explorer: O IQ-Explorer funciona de forma semelhante ao Windows Explorer. No entanto, um grande número de possibilidades adicionais são oferecidos desde que o IQ-Explorer saiba e possa usar a estrutura de informação relevante no âmbito da sua busca. Na sua forma mais simples o IQ-Explorer é usado para procurar documentos em que determinado texto esteja contido
- Comunicação do time: esta função possibilita que emails automáticos sejam enviados para informar a situação da análise entre os membros do time, que planilhas sejam enviadas também por email e que informações sobre o FMEA sejam publicadas tanto na internet como na intranet.
- Controle de terminologia: O IQ-FMEA apresenta um catálogo para facilitar o reuso de informações e conhecimentos já que a terminologia torna-se uniforme, sendo alcançado por meio do IQ-explorer.

2.5.2 Xfmea - ReliaSoft

A ReliaSoft Corporation é especializada no desenvolvimento de softwares para avaliação da confiabilidade em engenharia. A empresa sediada em Tucson, EUA, conta com um representante em São Paulo, a ReliaSoft Brasil.

O software Xfmea da ReliaSoft facilita o desenvolvimento das análises de FMEA, gerando automaticamente relatórios de análises de DFMEA/PFMEA e DRBFM. O Xfmea também permite o gerenciamento completo dos dados de entrada e saída das análises, incluindo o gerenciamento das ações de melhoria recomendadas.

O Xfmea está disponível em duas versões: A versão Xfmea Standard arquiva os dados em bancos de dados individuais do Microsoft Access e é indicada para uso individual ou departamentos pequenos. A versão Xfmea Enterprise centraliza os dados em uma única base de dados em SQL Server e é indicada para grandes departamentos e organizações.

Dentre as muitas funcionalidades do Xfmea, uma funcionalidade interessante é que o software armazena em seu banco de dados um conjunto/lista de frases de descrições utilizadas nas análises. É possível recuperar frases do banco de dados durante uma nova análise, agilizando o preenchimento dos formulários DFMEA/PFMEA e DRBFM.

Os relatórios gerados pelo Xfmea reportam informações sobre cada componente analisado do produto com seu(s) respectivo(s) modo de falha(s), apresentam também informações sobre os efeitos e causas dos modos de falhas, além de um plano de controle para as ações recomendadas e uma planilha para a revisão do projeto após as ações recomendadas serem finalizadas.

O Xfmea oferece ferramentas flexíveis que ajudam o usuário a:

- registrar e gerenciar os dados para análise dos modos e efeitos de falha;
- encontrar e reutilizar informações importantes de FMEAs existentes;
- avaliar o risco por meio do NPR ou análise de criticidade;
- realizar os métodos FMECA (*Failure mode, effects and critically analysis*), FMEA de sistema, DFMEA, PFMEA, e DRBFM.
- apresentar os dados da FMEA por meio de relatórios (APQP⁵, ISO TS 16949, entre outros);

⁵ APQPA (*Advance Product Quality Planning*): Planejamento avançado da qualidade do produto é uma estrutura de procedimentos e técnicas usadas para gerenciar a qualidade no desenvolvimento de produtos.

- criar diagramas de fluxo de processos e diagramas de blocos funcionais;
- construir gráficos com os resultados do FMEA;
- integrar a FMEA com análises relacionadas (incluindo DRBFM, Diagrama de Fluxo de Processo, Planos de Controle e Planos de Teste);
- personalizar o formulário FMEA em diferentes normas (SAE J1739, SAE ARP5580, AIAG FMEA (4th *edition*), MIL-STD-1629A, etc.);
- gerenciar as ações de melhoria (rastrear e concluir as ações), através de notificações via email e gráficos de controle de progresso;
- checar se a análise foi completa.

No capítulo seguinte, os métodos de análise de falhas potenciais serão tratados no contexto do processo de desenvolvimento de produtos.

3. A ANÁLISE DE FALHAS POTENCIAIS NO CONTEXTO DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

Considerando que as atividades típicas do Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) seguem a sequência Projetar-Construir-Testar-Otimizar, sendo que o que se “projeta-constrói-testa-otimiza” pode ser um conceito, uma especificação ou uma tolerância, tanto do produto quanto do processo de produção (ROZENFELD et al., 2006), a aplicação dos métodos FMEA e DRBFM deve ser feita de maneira integrada com essa sequência. Assim, à medida que o produto e o processo vão sendo especificados e detalhados vão ocorrendo iterações entre o PDP e esses métodos.

Desse modo, este capítulo trata da aplicação dos métodos de análise de falhas potenciais DFMEA/PFMEA/DRBFM, discutidos no Capítulo 2, dentro do contexto das atividades do processo de desenvolvimento de produtos, e apresenta uma sequência detalhada de realização do FMEA e DRBFM na forma de fases e atividades. O conteúdo do capítulo está em destaque na Figura 14.

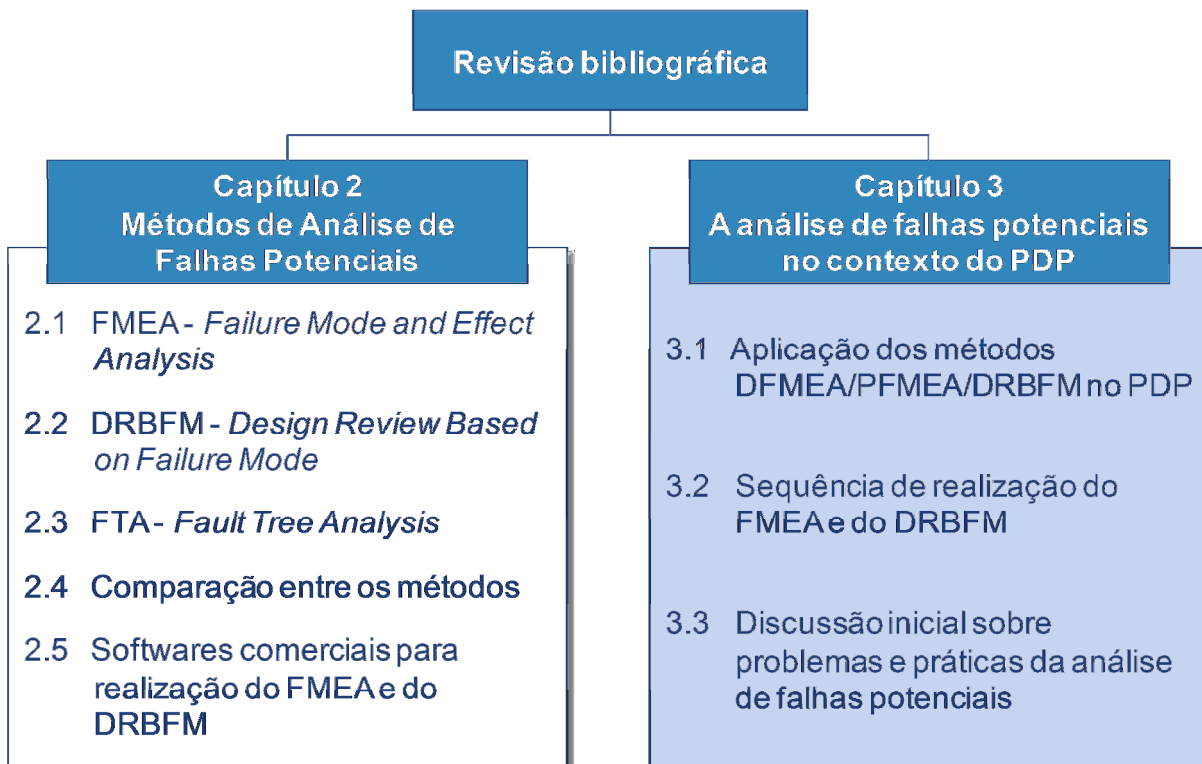


Figura 14 - Conteúdo do capítulo 3

Na primeira parte deste capítulo (item 3.1), é apresentado um modelo de referência para o processo de desenvolvimento de produtos. O objetivo da primeira

parte é apontar em qual momento do desenvolvimento ocorrem as atividades de análise de falhas e como elas interagem com as demais atividades do PDP.

As atividades da sequência descrita na segunda parte do capítulo (item 3.2) são um detalhamento das atividades de análise de falhas potenciais descritas no modelo de referência apresentado. A sequência é uma compilação das bibliografias estudadas, e seu escopo contempla desde a provisão da infra-estrutura necessária para aplicação dos métodos, até o gerenciamento de ações de melhoria. É importante destacar que, para fins de simplificação, o termo FMEA foi empregado como termo genérico para se referir à FMEA de sistema, DFMEA e PFMEA.

Por fim, é realizada uma introdução aos problemas e práticas da análise de falhas potenciais (item 3.3), que posteriormente é complementada no capítulo 5.

3.1. Aplicação dos métodos DFMEA/PFMEA/DRBFM no PDP

Em empresas onde os processos praticados são informais, é comum a coexistência de diferentes entendimentos sobre como o processo de desenvolvimento ocorre, dificultando a adoção de novas práticas (ROMANO, 2003).

Assim, muitas empresas adotam modelos para definir qual o padrão de trabalho que elas desejam adotar para o desenvolvimento de produtos. Modelos de referência descrevem o processo de desenvolvimento de produtos e servem para que empresas e seus profissionais possam desenvolver produtos segundo um ponto de vista comum (ROZENFELD et al., 2006). O compartilhamento único do processo entre as pessoas envolvidas no desenvolvimento facilita a implantação e integração de métodos, ferramentas e softwares de suporte ao PDP (SOUZA, 2005).

Neste trabalho, para ilustrar o conceito da aplicação dos métodos FMEA e DRBFM junto com as atividades do PDP, é adotado o modelo de referência de Rozenfeld et al. (2006) chamado Modelo Unificado. A Figura 15 apresenta o framework do Modelo Unificado.

Neste modelo, o PDP é dividido nas macro fases Pré-Desenvolvimento, Desenvolvimento e Pós-Desenvolvimento, que por sua vez, são subdivididas em fases que agrupam as atividades, as quais, em alguns casos, ainda são detalhadas em tarefas. Apesar das fases estarem apresentadas em uma forma sequencial na Figura 15, existe a sobreposição entre elas. Isto quer dizer que não é necessário que todas as atividades de uma fase estejam finalizadas para iniciar atividades da fase seguinte.

O que caracteriza uma fase é a entrega de um conjunto de resultados (*deliverables*), que, juntos, determinam um novo patamar de evolução do projeto de desenvolvimento. A avaliação dos resultados da fase serve também como marco importante de reflexão sobre o andamento do projeto, antecipando problemas e gerando aprendizagem. Esse processo de revisão ampla é denominado *gate*.

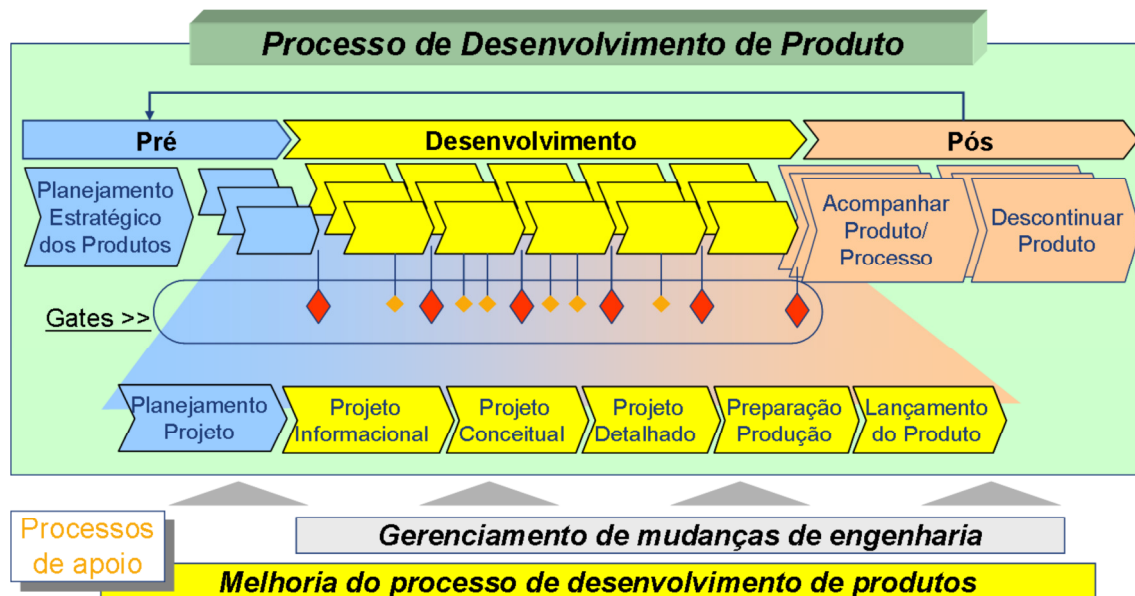


Figura 15 - Representação do Modelo Unificado (ROZENFELD et al., 2006)

Os *gates* que ocorrem entre as fases são chamados de *gates* gerenciais. Além desses, existem *gates* técnicos que sucedem no decorrer das fases da macro fase Desenvolvimento. Os *gates* técnicos são revisões técnicas do projeto. Na Figura 15 os *gates* gerenciais estão representados pelos losangos maiores e os técnicos pelos losangos menores.

A macro fase **Pré-Desenvolvimento** se inicia com a fase *Planejamento Estratégico dos Produtos*. Nessa fase, por meio de gestão de portfólio, são selecionados os projetos de produtos que são interessantes para a empresa e que farão parte do seu portfólio de projetos. A fase subsequente do pré-desenvolvimento é o *Planejamento de Projeto*, composta pelas atividades de determinação do escopo e planejamento do macro do projeto.

Na macro fase **Desenvolvimento**, as atividades realizadas na fase de *Projeto Informacional* estão principalmente relacionadas à aquisição de informações sobre o tema do projeto em questão e sua interpretação. As necessidades e desejos dos clientes são identificados, analisados e transformados em especificações técnicas a serem seguidas pelo projeto.

Na fase de *Projeto Conceitual*, são propostos conceitos a serem adotados pelo produto, tendo como base as informações obtidas na fase anterior. Essa fase relaciona-se com atividades de busca, criação, representação e seleção de soluções para o problema de projeto levantado. É então definido o layout do produto e das interfaces, o refinamento do estilo em termos de cor, aparência, acabamento, dimensionamento, e selecionados os materiais, componentes, processos de fabricação e montagem. Além da definição de aspectos ergométricos e estéticos, também são definidas parcerias de co-desenvolvimento.

Ainda na fase de Projeto Conceitual, após ser realizada uma síntese da estrutura de funções do produto e da proposição de alternativas de concepções, pode-se aplicar o **FMEA de sistema** para identificar problemas potenciais a serem solucionados na definição da concepção do produto. Aí então são selecionadas as alternativas mais adequadas.

No *Projeto Detalhado*, a disposição, a forma, as dimensões e as tolerâncias dos componentes do produto são concluídas e avaliadas, os desenhos de produção são gerados, os processos de fabricação são detalhadamente projetados, o fim de vida do produto é planejado, o produto é testado e homologado, e finalmente é enviada a documentação do produto aos parceiros. Esta é a fase mais complexa e suas atividades não são realizadas de forma sequencial e, sim, por meio de vários tipos de ciclos que garantem o paralelismo as atividades. Desse modo, Rozenfeld et al. (2006) apresentam o *Projeto Detalhado* como sendo ciclos – ciclo de detalhamento, ciclo de aquisição e ciclo de otimização, os quais são realizados simultaneamente com as atividades de planejamento do processo de fabricação e montagem, e de criação do material suporte do produto e embalagens. Na Figura 16 são ilustrados os três ciclos e suas atividades.

Embora todas as atividades do Projeto Detalhado sejam importantes, a atividade central é a **criação e detalhamento dos SSCs** (sistemas, subsistemas e componentes). Essa atividade acontece no ciclo de detalhamento, e é a partir dela que são acionadas as atividades do ciclo de aquisição e do ciclo de otimização. Dentre as tarefas dessa atividade procura-se reutilizar os SSCs disponíveis na própria empresa ou no mercado.

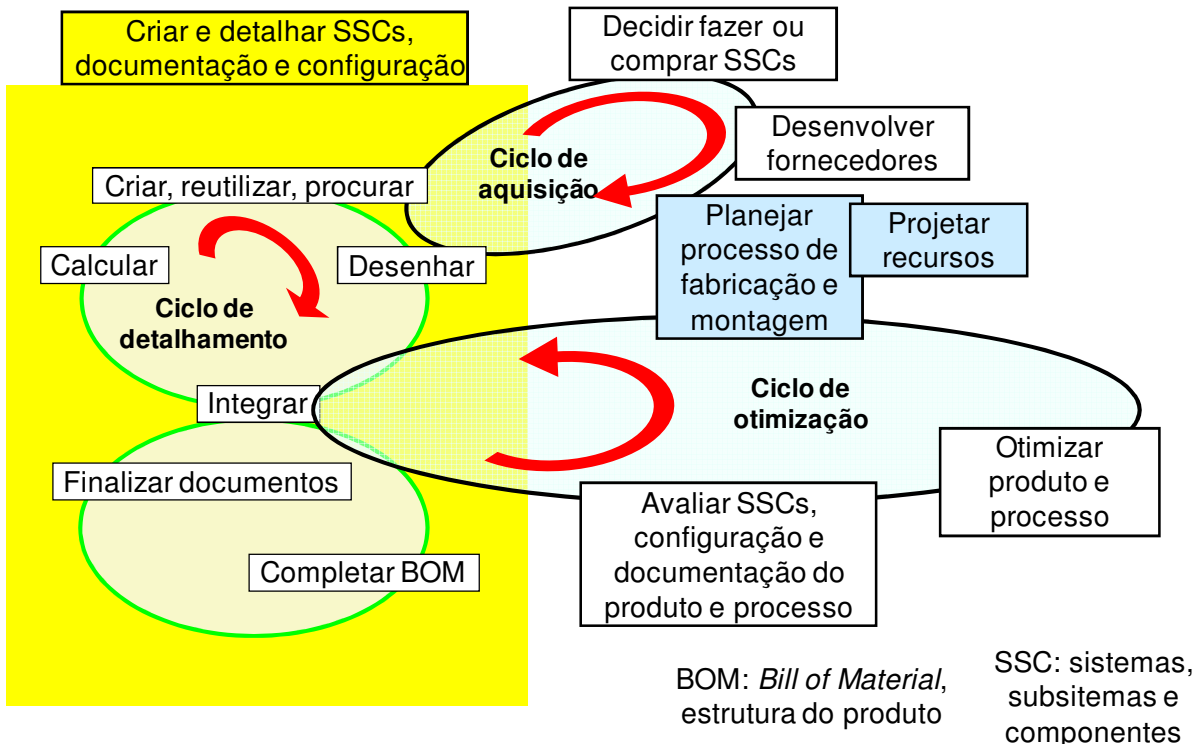


Figura 16 - Tipos de ciclos da fase de projeto detalhado (ROZENFELD et al., 2006)

Caso o sistema, subsistema ou componente não seja encontrado no banco de dados da empresa, o ciclo de aquisição é acionado. A empresa então tem que tomar a decisão entre fazer ou comprar esse item. No ciclo de aquisição também é previsto o desenvolvimento de fornecedores e os tipos de parcerias com esses fornecedores (parceria de risco, tecnológica, estratégica, etc.). A decisão de fabricar ou comprar o item vai depender se ele é estratégico ou não para a empresa, e sobre tudo dos resultados das avaliações financeiras.

O ciclo de detalhamento detalha os SSCs que foram definidos no Projeto Conceitual para o produto e os integra. Essa definição dos SSCs que ocorre no Projeto Conceitual é conduzida por meio de um processo de raciocínio *top-down* (de baixo para cima – do produto final para os componentes). A integração desses elementos acontece no Projeto Detalhado por um processo *bottom-up* (de baixo para cima – dos componentes para o produto final). A Figura 17 ilustra esse conceito.

No ciclo de otimização acontece avaliações dos detalhamentos, nas quais se verifica se são atendidos os requisitos dos clientes. Neste ciclo são executadas atividades de avaliação dos SSCs e otimização do produto e do processo.

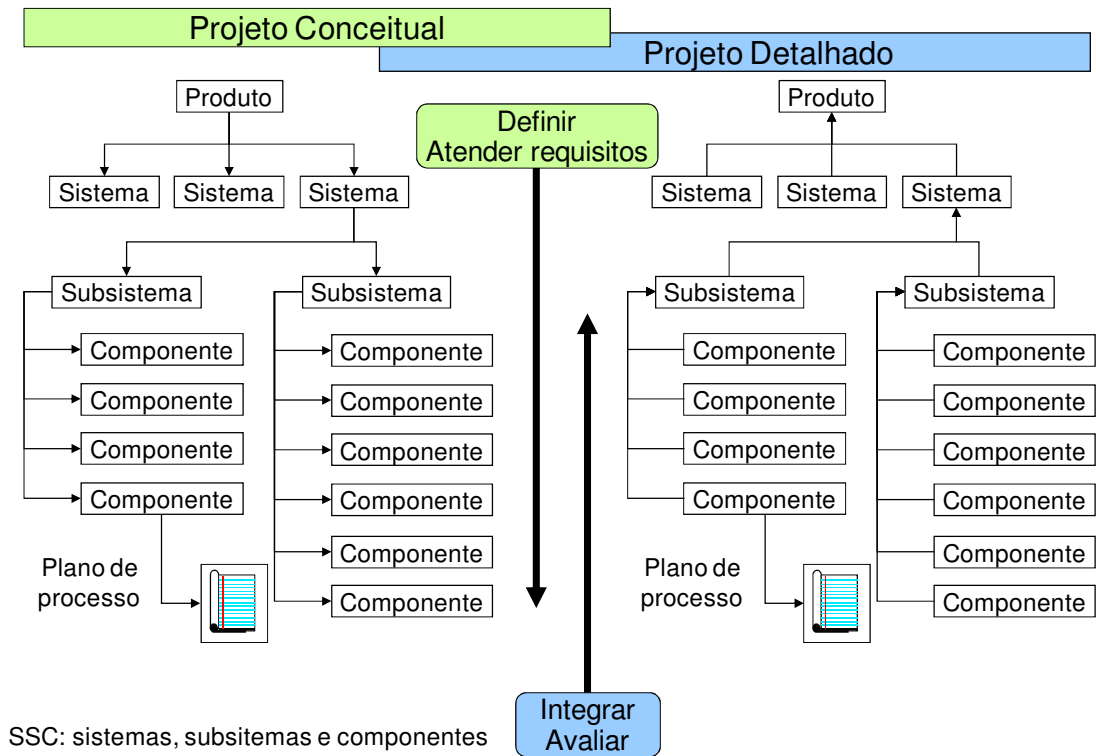


Figura 17 - Desdobramento dos SSC e sua integração ao projeto conceitual e detalhado (ROZENFELD et al., 2006)

A avaliação dos SSCs pode ocorrer de forma qualitativa, analítica ou experimental. Na Figura 18, apresenta-se uma visão geral dos métodos de avaliação.

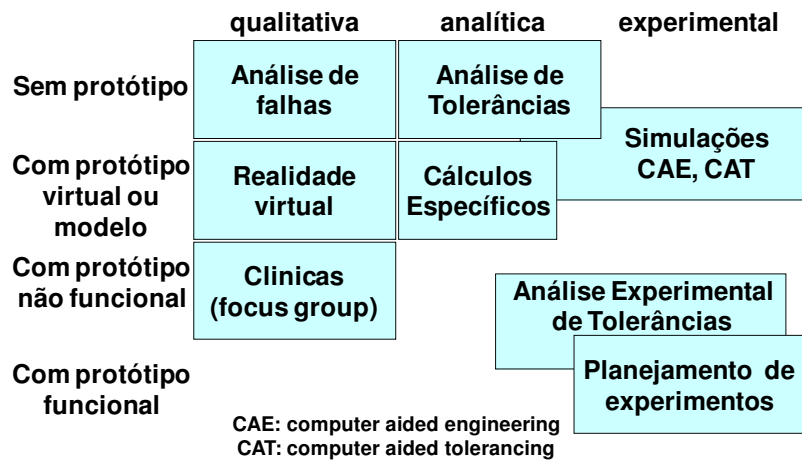


Figura 18 - Visão geral dos métodos de avaliação dos SSC (ROZENFELD et al., 2006)

A Avaliação analítica utiliza equações e regras que representam a influência de certos atributos de um item sobre outro, ou representam o comportamento do produto e seus SSCs sob a ação de alguma grandeza física relacionada com a sua aplicação (por exemplo, os esforços a que um componente é submetido durante sua aplicação).

A avaliação qualitativa é feita com base em critérios e experiência de várias pessoas. O time de desenvolvimento pode realizar, em conjunto, uma análise de falhas potenciais dos SSCs. Pode empregar também o método de clínicas (ou *focus group*), no qual um grupo de pessoas avalia características de protótipos não funcionais (*mockups*). A análise com base em realidade virtual pode avaliar tanto aspectos de estética do produto, quando realizada no início do PDP, quanto de aplicação, quando utilizada após a configuração do produto.

Na análise de falhas potenciais pode-se aplicar o **DFMEA** para os sistemas, subsistemas e componentes novos e o **DRBFM** para aqueles que são variações/modificações dos existentes. No segundo caso, toda e qualquer mudança deve ser avaliada, não importando o risco da falha potencial. O **DFMEA** pode aprofundar a análise realizada no Projeto Conceitual pelo **FMEA de sistema**. O **DRBFM** parte do **DFMEA** anteriormente realizado para o item que foi modificado.

Finalmente, a avaliação experimental estuda o comportamento do produto ou SSC em modelos dos sistemas ou protótipos funcionais. Os sistemas *Computer Aided Tolerancing* (CAT) são utilizados para a simulação de modelos virtuais. O planejamento de experimentos serve para levantar as respostas dos sistemas (produto, sistemas ou subsistemas) às entradas típicas de sua aplicação, avaliando também o seu comportamento perante perturbações advindas das condições de uso. Um método que utiliza o planejamento de experimentos é o de análise experimental de tolerâncias, usado para SSCs com parâmetros de natureza menos conhecida, e quando existe um inter-relacionamento entre eles.

Como foi dito, o ciclo de otimização é realizado de maneira simultânea à atividade de planejamento do processo de fabricação e montagem. Assim, as falhas potenciais das operações do processo que foram planejadas são analisadas por meio da aplicação do **PFMEA**.

A penúltima fase do Desenvolvimento, *Preparação da Produção*, consiste em planejar e organizar a fábrica para a produção do primeiro lote piloto do produto. Dessa forma, os recursos são recebidos e instalados no local adequado, o lote é produzido e avaliado, ações corretivas são implementadas e a produção é liberada.

Com todos os recursos em mãos, o *Lançamento do Produto* é realizado, sendo a última fase do Desenvolvimento.

A macrofase **Pós-Desenvolvimento** desdobra-se em duas fases: (1) *Acompanhar Produto/Processo*; (2) *Descontinuar Produto*. Nesta macrofase, além

do planejamento do acompanhamento do produto no mercado, são realizadas atividades de avaliação da satisfação dos clientes, monitoramento do desempenho do produto, auditorias, registro de lições aprendidas, e também atividades de planejamento de como o produto será retirado do mercado.

As falhas ocorridas durante a fase de uso, tanto as do produto em uso quanto as do processo de manufatura e montagem, são registradas e os formulários **DFMEA** e **PFMEA** devem ser atualizados. Essas informações podem ser úteis em análises de falhas de projetos variantes ou incrementais e também em projetos que compartilham SSCs do produto que falhou.

3.2. Sequência de realização do FMEA e do DRBFM

Esta subseção apresenta uma sequência de realização do FMEA e do DRBFM, desenvolvida a partir da compilação das principais bibliografias sobre a aplicação do FMEA e do DRBFM estudadas (STAMATIS, 1995; LEVIN e KALAL, 2003; SHIMIZU, IMAGAWA e NOGUCHI, 2003; PICKARD, MÜLLER e BERTSCHE, 2004; GM, 2005; AIAG, 2008; AJAYI e SMART, 2008; BERTSCHE, 2008; ALLAN, 2009; MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009).

A sequência proposta está dividida em dois momentos: **Preparação** e **Aplicação**. Na Preparação são conduzidas atividades de estabelecimento da infraestrutura necessária para conduzir a Aplicação. A aplicação, por sua vez, é composta das fases: **Planejamento**, **Condução das sessões de análise de falhas**, e **Gerenciamento de ações**. Na primeira fase é organizado tudo o que for necessário para conduzir as sessões de análise de falhas. Nas sessões da segunda fase são definidas ações de melhoria para se evitar que as falhas identificadas ocorram. Finalmente, na terceira fase, as ações resultantes de todas as sessões de análise de falhas são gerenciadas de maneira integrada com as demais ações do PDP. A Figura 19 ilustra a sequência proposta.

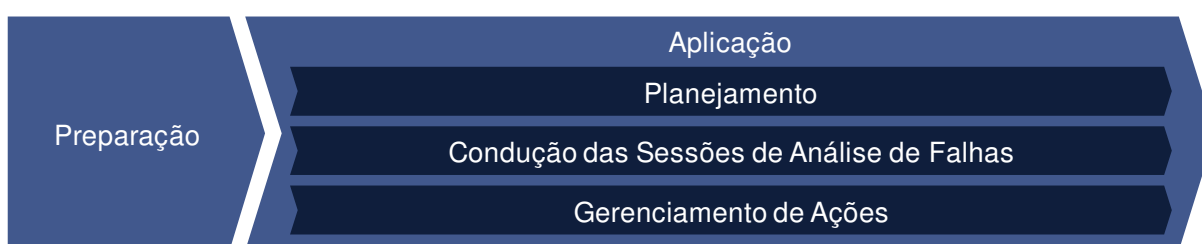


Figura 19 - Momentos e fases da sequência proposta

Nas subseções seguintes são descritos o momento Preparação e as fases do momento Aplicação.

3.2.1 Preparação

As atividades definidas para o momento Preparação são:

- Adquirir e instalar um software adequado de apoio a elaboração do FMEA/DRBFM; e
- Treinar pessoas (LEVIN e KALAL, 2003; AIAG, 2008; MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009).

O uso de uma terminologia consistente pode ser alcançado se o FMEA/DRBFM for executado com a ajuda de um software adequado (PICKARD, MÜLLER e BERTSCHE, 2004). Com os softwares apresentados no item 2.5 é possível controlar a terminologia durante a entrada de dados, no sentido de se atribuir os mesmos nomes para as mesmas coisas. Se um colaborador nomeia, por exemplo, um vazamento de “evasão” e outro nomeia de “escape”, a busca e recuperação de informações para reuso é dificultada (APIS, 2009). Além disso, quando múltiplos termos são usados para o mesmo significado, ou quando um mesmo termo é usado com múltiplos significados, podem ocorrer ambiguidades na interpretação do texto (GRANTHAM LOUGH, STONE e TUMER, 2008). A padronização dos termos empregados pode resolver esses problemas (GRANTHAM LOUGH, STONE e TUMER, 2008). Podem-se utilizar taxonomias ou catálogos para nomear componentes, operações, funções, modos de falha, efeitos, causas e ações, durante a entrada de dados nos formulários FMEA/DRBFM (APIS, 2009; RELIASOFT, 2009). Listas de termos de taxonomias e de catálogos podem ser inseridos no banco de dados do software ou podem ser elaborados catálogos durante a entrada de dados, à medida que o software é usado (APIS, 2009; RELIASOFT, 2009).

Os softwares apresentados no item 2.5 possuem a funcionalidade de se criar e reutilizar textos padrão. Com esse recurso o preenchimento dos campos do formulário do FMEA/DRBFM pode ser melhorado tecnicamente, aproveitando consideravelmente o tempo. Conforme informações vão sendo inseridas nos formulários, podem-se criar textos padrão para funções, operações, requisitos, modos de falha, efeitos, causas e ações de detecção e de prevenção e armazená-

los em um catálogo do banco de dados do software. Com o catálogo, os textos padrão podem ser pesquisados e reutilizados conforme a conveniência. Grandes listas de textos podem ser categorizadas para facilitar o resgate.

3.2.2 Fase de Planejamento

A fase de planejamento é composta de cinco atividades, detalhadas nesta seção:

- Selecionar itens e definir escopo das análises;
- Definir foco;
- Definir times;
- Coletar e preparar informações; e
- Construir cronograma das sessões de análise.

A Figura 20 mostra o fluxo da fase Planejamento por meio da notação BPMN (*Business Process Modelling Notation*).

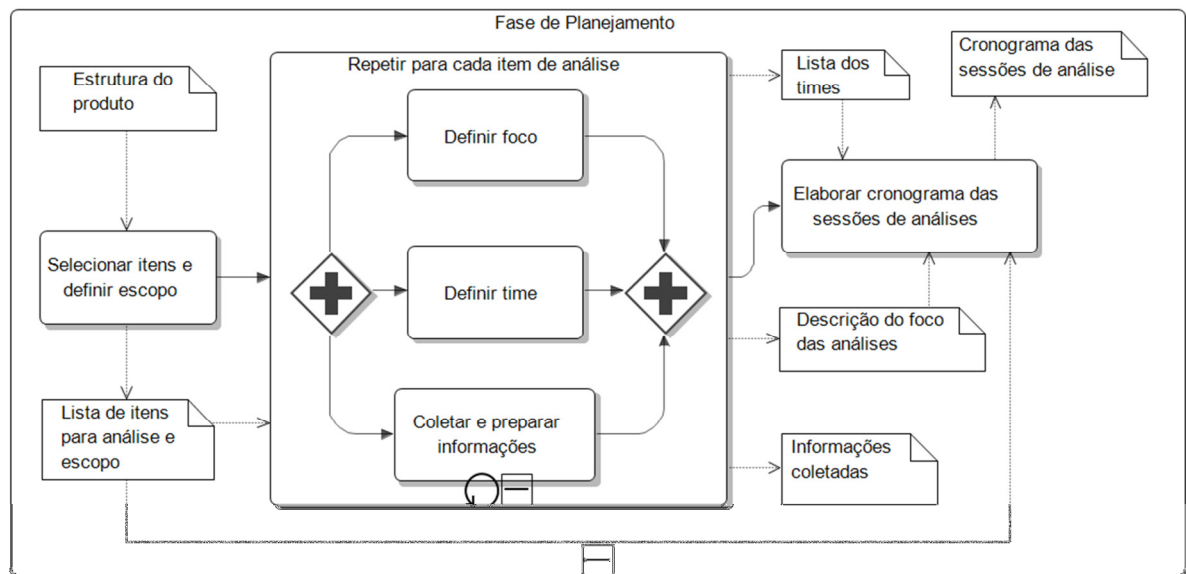


Figura 20 - Fluxograma da fase de planejamento

Selecionar itens e definir escopo

A primeira atividade se inicia com estrutura do produto (BOM – *Bill of Material*), advinda do PDP, e termina com uma lista dos itens que serão analisados. Com a BOM são selecionados os itens que serão analisados e definido o escopo de cada análise. A escolha dos itens deve levar em conta tanto critérios como complexidade, grau de novidade e risco (segurança), dos itens, quanto limitações de recursos (pessoal, tempo, dinheiro, etc.) para a execução das análises (BOOKER,

RAINES e SWIFT, 2001). O escopo estabelece as fronteiras da análise, ou seja, define o que é incluído e o que é excluído, prevenindo que o time de FMEA foque no aspecto errado do produto ou do processo durante uma sessão de análise de falha (MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009).

Definir foco

Para cada item selecionado é definido o foco e times das análises, e coletadas informações apropriadas para cada item a ser analisado. Essas três atividades podem ser feitas de maneira simultânea.

Definir um foco de análise maximiza o valor do tempo do time nas sessões de FMEA (AIAG, 2008). O foco que é dado depende se existe um FMEA associado ao item ou não, e se foram propostas/realizadas mudanças para o respectivo item. Esta regra segrega os itens nos grupos:

1. Itens novos: Itens que não possuem um FMEA associado, ou seja, nunca foi feita uma análise de falhas para esses itens;
2. Itens ou condições de uso modificadas: Itens que possuem um FMEA associado e foram propostas/realizadas mudanças em seu projeto/processo ou ambiente (condição) de uso;
3. Itens revisados: itens que possuem um FMEA associado e não foram modificados.

A Figura 21 ilustra, na notação BPMN, o fluxograma da atividade de definir foco.

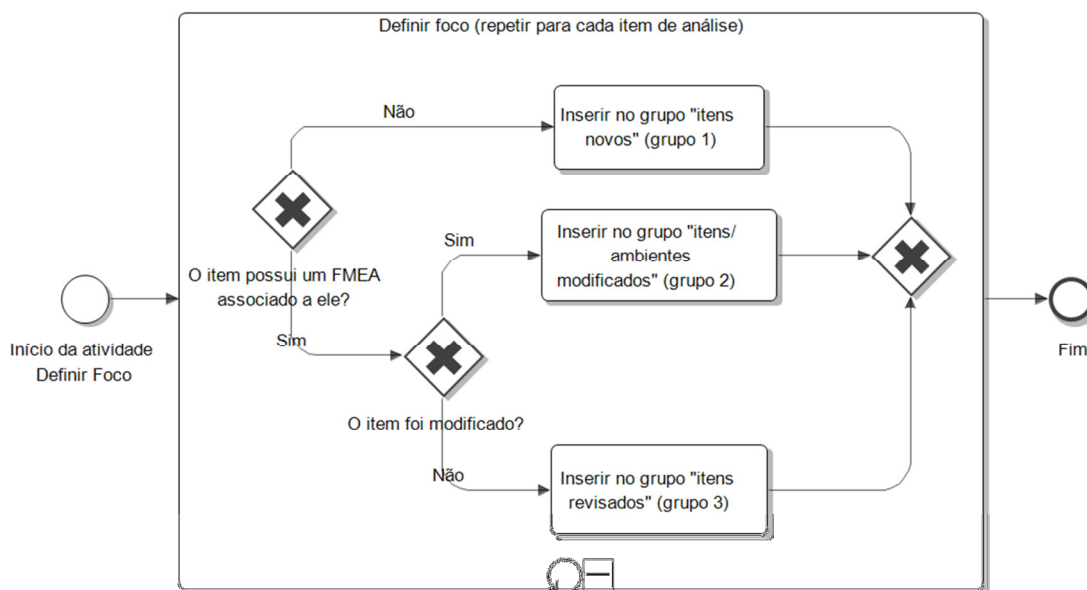


Figura 21 - Fluxograma da atividade Definir Foco

O foco para os itens do grupo “Itens novos” depende: (a) da complexidade do sistema – o item é um componente simples ou um sistema complexo? (b) da maturidade da tecnologia – é usada uma tecnologia madura/conhecida ou completamente nova? (c) da maturidade do processo – o processo de manufatura usado é maduro/conhecido? (d) de causas de falha impostas ou comuns. É importante definir em qual dos quatro aspectos acima se enquadra o foco das análises dos itens. Esses quatro aspectos são descritos a seguir:

- (a) Para um componente simples, o foco deve estar no entendimento do mecanismo de falha. Para um sistema um pouco mais complexo com componentes que interagem entre si para produzir a função especificada, o foco, além do entendimento do mecanismo de falha, deve se estender aos efeitos emergentes das interações ou das propriedades do sistema. Para um sistema complexo, além das falhas dos componentes e efeitos interativos, o foco deve se estender para o entendimento modos de falha comuns e causas múltiplas de falhas – como uma falha em um subsistema pode impactar na funcionalidade de outro subsistema e levar a uma falha catastrófica no sistema;
- (b,c) Para uma tecnologia ou processo maduro/conhecido, informações consolidadas sobre causas de falha podem ser conseguidas estudando produtos similares do mercado. Desse modo, é consumido um tempo relativamente menor na identificação de causas de falha. Se a tecnologia ou processo forem completamente novos, grande porção de tempo e recursos tem que ser despendidos na caracterização e entendimento de causas de falha;
- d) Presença de causas de falha impostas, tais como efeitos do ambiente – temperatura, umidade, poeira, níveis de luz, etc. e sua associada influência sob o modo de falha é um estudo essencial.

Para itens do grupo “Itens ou condições de uso modificadas” o foco deve ser no estudo do impacto da mudança sobre as funções e requisitos do item. Para esse estudo é seguido os passos do método DRBFM. O método DRBFM é usado para analisar os impactos das mudanças sob o produto, procedimentos de avaliação, e sob os processos de produção (AIAG, 2008). É importante que as razões que levaram a mudança sejam completamente entendidas. Se a mudança for para corrigir falhas que vem ocorrendo no campo, por exemplo, pode ser examinado o respectivo relatório de falhas em campo, relatórios de reclamações de clientes, e

dados da assistência técnica. Deve-se garantir que as mudanças não introduzirão novas falhas potenciais.

Finalmente, para itens do grupo “Itens revisados”, conforme a conveniência e o caso, o foco pode ser tanto (1) aprofundar um FMEA já realizado quanto (2) confrontar as falhas registradas no FMEA com as que vem ocorrendo com frequência no processo de fabricação e no uso do produto. No primeiro caso pode ter ocorrido uma limitação na aplicação do FMEA devido à falta de informações, agora disponíveis. O segundo caso permite incorporar ao FMEA falhas que não foram previstas, reavaliar, com base em dados objetivos, falhas previstas, e propor ações de melhoria contínua.

Definir time

Para cada item selecionado devem-se definir os times que executarão as sessões de análise de falhas. Podem ser selecionados engenheiros de projeto, processo, testes, fabricação, inspeção, materiais, campo, etc. Além desses, também deve ser considerado como um possível membro do time o cliente, seja interno ou externo à organização, pois ele pode contribuir com uma perspectiva singular (STAMATIS, 1995; MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009). Não obstante, deve ser levado em conta se a especialidade dos convocados é adequada para o tipo de item, escopo e foco das análises (AIAG, 2008).

Para cada time devem ser definidos um líder (responsável) e um secretário. O primeiro, geralmente o gerente de projeto do item, conduz as atividades da sessão de análise de falhas. O segundo auxilia o responsável em tarefas como controlar o tempo da sessão e registrar, no formulário do FMEA/DRBFM, os pontos principais discutidos e as decisões tomadas.

Coletar e preparar informações

Antes de se iniciar uma sessão de FMEA/DRBFM devem ser coletadas as informações existentes, necessárias para uma efetiva e eficiente sessão de análise de falhas (AIAG, 2008). Para cada tipo de item (novos, modificados, ou revisados), o tipo de informação necessária e a preparação podem variar. Nos tópicos abaixo são listados tipos de informações para cada tipo de item de análise. É importante enfatizar que estas sugestões devem ser adaptadas caso a caso, conforme conveniência (se a análise for de produto ou de processo) e disponibilidade de informações.

1. “Itens novos”: requisitos, especificações, funções, diagramas de bloco funcional, diagramas de fluxo do processo, instruções de trabalho, desenhos mecânicos, esquemas elétricos, protótipos e resultados de testes;
2. “Itens ou condições de uso modificados”: FMEA anterior, justificativas e detalhes das mudanças (geralmente presentes no documento “solicitação de mudança de engenharia”), histórico/relatórios de falhas em campo, reclamações de clientes, relatórios da assistência técnica, protótipos (anterior, semelhante), desenhos e esquemas (anterior e posterior às mudanças). Além da coleta de informações, para cada item desse grupo, é preparada, pelo projetista responsável, a “lista de pontos modificados”, a “matriz relacional entre funções e pontos modificados”, e realizada a análise inicial das mudanças propostas (vide item 2.2.2)
3. “Itens revisados”: FMEA anterior, informações adicionais (não disponíveis na análise anterior, ou detalhamentos), histórico/relatórios de falhas em campo, reclamações de clientes, relatórios da assistência técnica e relatórios do controle estatístico do processo.

Deve ser preparada a sala onde serão realizadas as sessões de análise de falhas. Na sala, deve estar disponível um computador, no qual esteja instalado o software de apoio à elaboração do FMEA/DRBFM (item 3.2.1) e um projetor de imagens.

Construir cronograma das sessões de análises

Na elaboração do cronograma das sessões de análise de falhas definem-se datas, local e duração das reuniões de cada sessão. Quando forem definidas as datas, deve ser levado em conta o tempo necessário para a implementação das ações de melhoria advindas das sessões. A estimativa da duração das sessões pode ser baseada em experiência anterior, de acordo com o risco (segurança), complexidade, grau de novidade e tipo de grupo em que cada item se encontra.

3.2.3 Fase de Condução das sessões de análise de falhas

Em uma sessão de análise de falhas é aplicado o método FMEA para itens dos grupos “Itens novos” e “Itens revisados”, e o método DRBFM para itens do grupo “Itens ou condições de uso modificadas”. Cinco atividades principais compõem a aplicação do FMEA e três a aplicação do DRBFM. A Figura 22 mostra, na notação BPMN, o fluxo das atividades e as entradas da fase Condução das sessões de análise de falhas.

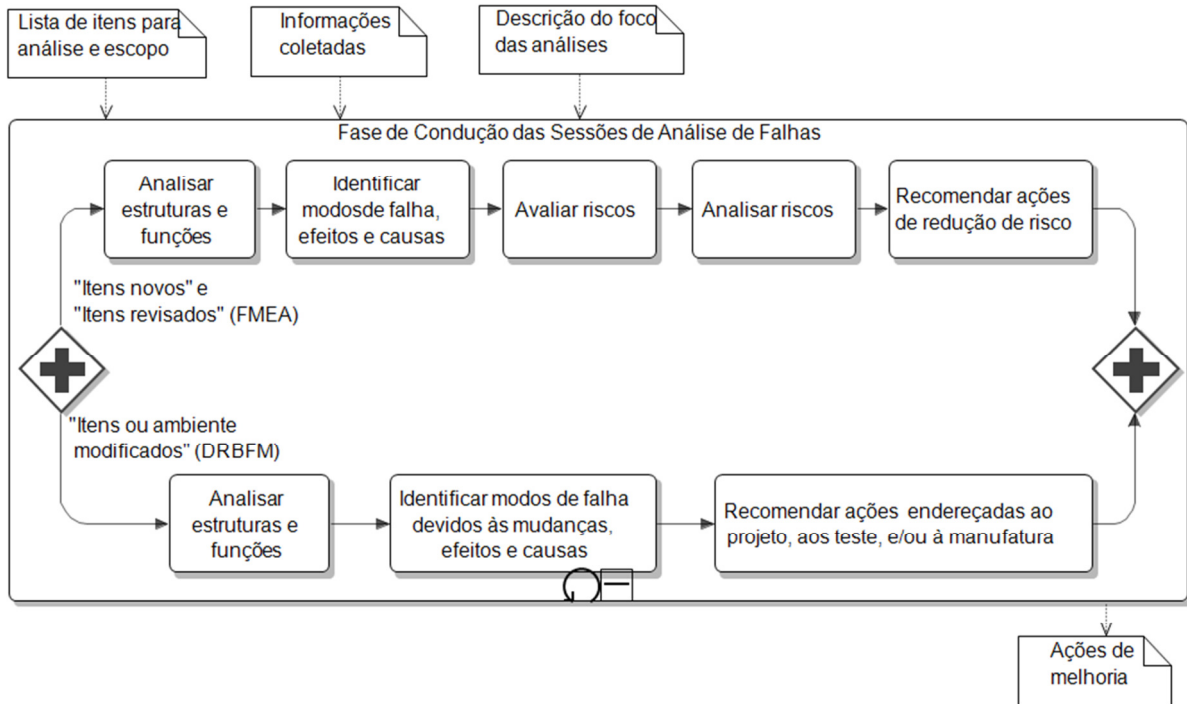


Figura 22 - Fluxograma da fase de Condução das sessões de análise

A descrição das atividades é feita a seguir.

Analisar estrutura e funções

O objetivo desta atividade é garantir que todos os membros do time tenham entendimento comum do item em análise. Sendo assim, o responsável pela análise descreve, aos membros do time, as funções, especificações e requisitos que devem ser atendidos. Na explicação podem ser utilizados Diagramas de Bloco Funcional (DBF) e/ou Diagrama de Fluxo de Processo (DFP), e, quando disponível, desenhos, protótipos e modelos virtuais.

Quando o item de análise for do grupo “Item ou condições de uso modificadas” é dada uma explicação adicional sobre os detalhes das mudanças. São utilizadas as ferramentas “Lista de pontos modificados” e “Matriz função x pontos modificados”, elaboradas na fase de Planejamento.

Identificar modos de falha, efeitos e causas

Após o time ter analisado detalhadamente o item e suas funções, nesta atividade, usando o computador, como software de apoio, e o projetor de imagens⁶, são identificados os modos de falha das funções, seus efeitos e suas causas. Para cada grupo de itens é tomada uma abordagem diferente.

⁶ O uso do projetor de imagens mantém todos os membros do time focados no mesmo ponto.

Para itens do grupo “Itens novos” a técnica FTA (*Fault Tree Analysis*) é integrada ao FMEA (KRASICH, 2000; ARCIDIACONO e CAMPATELLI, 2004; BLUVBAND, POLAK e GRABOV, 2005), para organizar e hierarquizar modos, causas e efeitos de falhas, identificando causas combinadas que levam a um modo de falha. A descrição dos passos dessa integração é apresentada no Apêndice A.

Para itens do grupo “Itens ou condições de uso modificadas”, o formulário DRBFM previamente preenchido na fase de planejamento e preparação é projetado em uma parede. Então o time discute e revisa o que foi elaborado, acrescentando problemas potenciais devido às mudanças, efeitos adversos sobre os consumidores, e causas dos problemas potenciais que não foram observados pelo projetista responsável pela análise. Se necessário, as técnicas *brainstorming*⁷ e FTA podem ser empregadas.

Para itens do grupo “Itens revisados”, o formulário FMEA, elaborado na análise anterior, é projetado em uma parede. O responsável o revisa junto com os membros e junto ao time são analisadas as novas informações coletadas para o item. Dependendo do foco estabelecido, a análise pode ser aprofundada e/ou (2) as falhas registradas são confrontadas com as que vem ocorrendo no processo de fabricação e uso do produto, para serem propostas ações de melhoria.

Avaliar riscos

Esta atividade ocorre apenas nas sessões de FMEA. Nela, primeiramente, são listadas as ações/controles que foram estabelecidas para prevenir e/ou detectar os modos falhas e/ou as causas, e, posteriormente, são atribuídos valores numéricos para os índices de risco Severidade, Ocorrência e Detecção, e calculado o RPN (*Risk Priority Number*).

Ao se atribuir valores para o índice de severidade, devem ser considerados quais requisitos foram priorizados pelo cliente (atendimento à qualidade demanda) no QFD (Desdobramento da Função Qualidade - *Quality Function Deployment*) (ALMANNAI, GREENOUGH e KAY, 2008).

A avaliação da probabilidade de ocorrência da causa da falha potencial é realizada de acordo com a eficiência dos controles e ações preventivas estabelecidas para limitar ou evitar a respectiva causa de falha (AIAG, 2008).

⁷ Com a aplicação do *brainstorming* todos os membros do time podem contribuir igualmente, mantendo-os engajados a participarem.

De maneira análoga, a avaliação da probabilidade de detecção da causa é realizada levando em conta a eficiência dos controles ou ações de detecção estabelecidos para detectar a causa da falha. Para esse caso, assume-se que a falha ocorreu e o controle a detecta antes de chegar ao cliente (AIAG, 2008).

Quando o grupo estiver avaliando um índice, os demais não podem ser levados em conta, ou seja, a avaliação de cada índice é independente (ROZENFELD et al., 2006; AIAG, 2008; BERTSCHE, 2008). Por exemplo, se o time estiver avaliando o índice de severidade de uma determinada falha, cujo efeito é significativo, o time não deve atribuir um valor mais baixo para este índice somente porque a probabilidade de detecção seja alta (ROZENFELD et al., 2006).

Podem existir diferentes opiniões de cada membro do time, devido às diferentes perspectivas que cada um tem. Discórdias, sem um processo estruturado para resolvê-las, podem desperdiçar grande quantidade de tempo e energia (MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009). Desse modo, o time deve concordar, de antemão, com uma maneira de se lidar com opiniões diferentes. McDermott et al. (2009) sugerem as seguintes práticas para se resolver discórdias na atribuição do valores dos índices: votação, consulta a um colaborador com alto nível de conhecimento e experiência, eleição de um dos membros do time para tomar a decisão final, e adoção do valor mais alto.

A avaliação dos riscos é conduzida para ações que já foram implementadas. Para que o risco seja reduzido ainda mais, ações adicionais usualmente são necessárias. A proposição de ações é feita na próxima atividade.

Analisar riscos

Do mesmo modo que na atividade anterior, Analisar riscos somente é realizado em sessões de FMEA.

Para se decidir quais ações de melhoria serão propostas para o projeto do produto/processo, devido à inerente limitação de recursos (tempo, orçamento, tecnologia, pessoal, etc.), o time deve analisar cautelosamente cada índice de risco e os RPNs.

Usualmente, apenas o valor do RPN é considerado na priorização das ações de melhoria. Nestes casos, ações de melhoria são propostas somente para falhas que possuam RPN acima de certo limite ($RPN \geq 100$, por exemplo) ou de acordo com o princípio do Pareto (20 – 30 % dos RPNs mais altos). No entanto, estabelecer um limite inferior ou faixas de RPN para se determinar a necessidade de ações **não**

é uma prática recomendada. Utilizar patamares inferiores para priorizar RPNs é assumir que o RPN é uma medida relativa de risco e que a melhoria contínua não é necessária, o que não é verdadeiro. Além disso, essa prática pode promover uma disfunção de comportamento dos membros do time, levando-os a perder tempo na tentativa de justificar valores mais baixos dos índices de ocorrência ou de detecção para manter o RPN abaixo do limite estabelecido (AIAG, 2008).

Sendo assim, a análise para priorização de RPNs deve levar em consideração os três índices de risco conjuntamente e individualmente (AIAG, 2008; BERTSCHE, 2008), não existindo valor específico de RPN que obrigatoriamente necessite de uma ação de melhoria.

Recomendar ações

Recomendar ações para melhoria do *design* do produto ou do processo é a última atividade da sessão de FMEA/DRBFM. Para cada ação recomendada são definidos responsáveis e prazos para implementação. As ações que forem definidas podem ser incorporadas no cronograma das atividades do PDP. Dessa maneira é possível visualizar todas as atividades referentes a um item, quais já foram executadas, quais estão atrasadas, e quais estão no prazo.

Devido às inerentes limitações de recursos, tempo, tecnologia, e outros fatores, o time deve escolher como melhor priorizar determinar os esforços de redução de risco. A quarta edição do manual de FMEA da AIAG (2008) prescreve que o foco inicial do time deve ser orientado para os modos de falhas com maiores índices de severidade. Para modos de falhas com severidade igual ou menor que 8 o manual recomenda considerar causas que tenham maiores índices de ocorrência ou detecção. Vale destacar que o uso de controles de detecção deve ser a última opção, pois, geralmente, possuem um custo de operação elevado (AIAG, 2008; BERTSCHE, 2008). Dessa forma, devem-se priorizar as que reduzem os valores dos índices na seguinte ordem: severidade, ocorrência, e detecção.

3.2.4 Fase de Gerenciamento de ações

Nesta fase, as ações resultantes de todas as sessões de análise de falhas são gerenciadas junto com as demais ações do PDP. Os softwares de FMEA/DRBFM podem ser usados com uma ferramenta de apoio para as atividades dessa fase. Essas atividades são representadas na Figura 23.

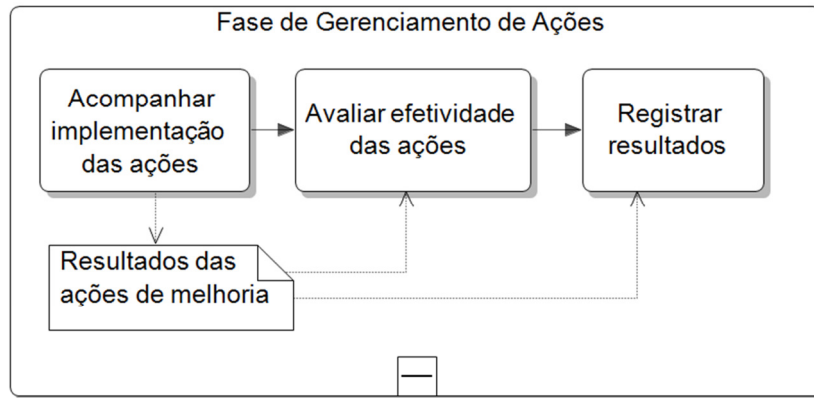


Figura 23 - Fluxograma da fase de Gerenciamento de Ações

É feito o acompanhamento da implementação das ações para assegurar que as ações de melhoria propostas nas sessões de análise de falhas estão sendo adequadamente implementadas.

Posteriormente à implementação, com os resultados das ações em mãos, cada time que realizou as sessões de análise de falhas se reúne novamente, para avaliar a efetividade das ações de melhoria implementadas e registram os resultados obtidos nos respectivos formulários FMEA ou DRBFM.

Caso as ações não tenham o efeito esperado, possivelmente porque as respectivas causas dos modos de falha não foram encontradas, este item é tratado como um “item revisado” em uma próxima iteração do método.

3.3. Discussão inicial sobre problemas e práticas da análise de falhas potenciais

Diversos problemas da aplicação de métodos de análise de falhas potenciais têm sido publicados na literatura. Alguns desses problemas referem-se (1) ao momento de realização da análise de falhas potenciais no ciclo do PDP, (2) à integração/interatividade de métodos de análise de falhas potenciais com o PDP, e (3) à reutilização de conhecimentos sobre falhas. A seguir, esses temas são detalhados.

1. Momento realização da análise de falhas potenciais no ciclo do PDP: usualmente as empresas executam a análise de falhas potenciais em um estágio muito avançado do ciclo de desenvolvimento de um novo produto, tendo ela pequena influência na melhora global do projeto (*design*) do produto (MCKINNEY, 1991). Dessa forma, a análise é usualmente feita com o propósito de checagem ou por obrigação contratual de clientes, e não para antecipação de falhas. Essa postura

leva ao aumento do número de *redesigns* (retrabalho) durante o PDP (KARAZAITRI et al., 1991).

2. Integração/interatividade de métodos de análise de falhas potenciais com o PDP: o FMEA é tratado como uma técnica isolada, ou seja, não é integrado com outros métodos/ferramentas e atividades do PDP (STAMATIS, 1995; WIRTH et al., 1996; SHAHIN, 2004; KRASICH, 2007). As saídas do FMEA, por exemplo, poderiam ser usadas como entradas para atividades subsequentes do processo de desenvolvimento do produto.
3. Reutilização de conhecimentos sobre falhas: comumente, em análises de sistemas similares, tanto dados de falhas em campo quanto análises anteriores não são considerados/recuperados (MCKINNEY, 1991; STONE, TUMER e STOCK, 2005; AJAYI e SMART, 2008; GRANTHAM LOUGH, STONE e TUMER, 2008). “(...) *Nem mesmo falhas anteriores de componentes mecânicos com part number idênticos são apresentadas como possíveis modos de falha (...)*” (MCKINNEY, 1991).

As técnicas de análise de falhas potenciais são consideradas pelos praticantes como técnicas tediosas que consomem muito tempo (HUNT, PUGH e PRICE, 1995; PRICE et al., 1995; STONE, TUMER e STOCK, 2005). Suas aplicações podem aumentar a carga de trabalho dos engenheiros em até 20%, e apesar dos esforços, os resultados são pobres (WIRTH et al., 1996). Outra reclamação comum é que suas análises são subjetivas, baseadas na experiência dos praticantes (BELL et al., 1992).

Em resposta aos problemas, nos trabalhos estudados são apresentadas práticas para solucionar os problemas. Um exemplo nesta direção é de um método desenvolvido por pesquisadores de universidades americanas em conjunto com a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) para registrar o conhecimento sobre falhas, que usa uma taxonomia padrão para nomear componentes mecânicos e seus possíveis modos de falhas (TUMER, STONE e BELL, 2003; GRANTHAM LOUGH, STONE e TUMER, 2008). A taxonomia padrão contribui para eliminar imprecisões terminológicas que dificultam o reuso de informações sobre falhas advindas tanto de sessões de aplicação de um FMEA, quanto de relatórios de falhas em campo. O reuso do conhecimento sobre falhas evita a recorrência de falhas, torna as análises de falhas potenciais menos subjetivas e possibilita que elas sejam realizadas no início do desenvolvimento de

produtos, quando o custo para realizar mudanças no projeto (*design*) do produto e em seu processo de fabricação é mais baixo.

Na universidade de Stanford foram desenvolvidas diversas adaptações para o método FMEA, tais como, *Scenario-based FMEA*, *Life Cost-based FMEA*, e *Assembly process FMEA*. O *Scenario-based FMEA* organiza sequências de eventos não desejados de causa-efeito ao invés de modos de falhas (KMENTA e ISHII, 2004). *Life Cost-based FMEA* mede o risco das falhas potenciais em termos de custo total que elas incorreriam caso acontecessem (RHEE e ISHII, 2004). *Assembly process FMEA* foi desenvolvido especificamente para identificar erros em montagens manuais (KMENTA, ISHII e CHELDELIN, 2003).

Outros trabalhos apresentam conceitos para automatizar o FMEA, usando inteligência artificial, e torná-lo menos laborioso. Price et al. (1995) e Bell et al. (1992) empregaram respectivamente simulações qualitativas e processo de raciocínio causal (*causal reasoning process*) para produzir relatórios mais completos e consistentes com o ciclo do desenvolvimento do produto. Foi dado um passo a frente na automação do FMEA com o desenvolvimento de um conceito que analisa os efeitos de falhas múltiplas significativas (PRICE e TAYLOR, 2002). Para oferecer resultados precisos para os projetistas, foi desenvolvido um software que usa simulação quantitativa (MONTGOMERY e MARKO, 1997). Redes Bayesianas foram empregadas para construir modelos probabilísticos de grafos acíclicos dirigidos (*directed acyclic graph – DAG*) que representam dependências causais e estatísticas entre estados de falhas de sistemas internos e externos (cliente e o mundo) e variáveis de eventos de sistemas físicos (LEE, 2001). Contudo, as técnicas de automação são limitadas a sistemas que podem ser modelados matematicamente, possuindo comportamentos previsíveis, como, por exemplo, circuitos eletrônicos.

Nota-se que o foco dessas práticas são variações e modificações do método FMEA. No entanto, como foi descrito no item 1.1 desta dissertação, os métodos de análise de falhas potenciais são construídos e usados incorretamente, por não serem totalmente entendidos tecnicamente, (JOHNSON, K.G. e KHAN, M. K., 2003). Desse modo, percebe-se que existe a necessidade de um instrumento que avalie se uma empresa está aplicando de maneira efetiva o método de análise de falhas potenciais escolhido.

Para preencher essa lacuna, os pesquisadores Farris et al. (2007) desenvolveram uma abordagem para avaliar a efetividade de métodos de

engenharia aplicados no processo de desenvolvimento de produtos. A abordagem proposta contém dois instrumentos de avaliação, Instrumento de Avaliação da Qualidade do *Processo* de aplicação e Instrumento de Avaliação da Qualidade dos *Resultados* da aplicação (para detalhes desses instrumentos, vide item 4.4.3). O primeiro instrumento é genérico para ser aplicado a qualquer método de engenharia. O segundo é específico para cada método, e foi apresentado para os métodos FMEA e 3P (*Production Preparation Process*).

Farris et al. (2007) afirmam que a abordagem e instrumentos de avaliação desenvolvidos podem fornecer aos gerentes de projetos e outros tomadores de decisão *feedback* detalhado sobre a aplicação desses métodos. A abordagem e os instrumentos podem apontar práticas para melhoria no processo usado para aplicar um dado método de engenharia, como por exemplo, envolvimento de *stakeholders*, aderência ao processo prescrito, etc., e a qualidade dos resultados da aplicação. Essas informações podem ajudar uma organização a melhorar a efetividade geral da aplicação de métodos de engenharia no processo de desenvolvimento de produtos.

A conclusão que se chega é que, devido à grande quantidade de problemas e de práticas da análise de falhas potenciais torna-se necessário estudá-las de maneira sistemática. Para esse fim, optou-se por realizar uma revisão bibliográfica sistemática (RBS). O procedimento adotado para esse fim é descrito no item 4.4.3 do próximo capítulo. Os resultados da RBS conduzida são apresentados no capítulo 5.

4. METODOLOGIA CIENTÍFICA E FASES DA PESQUISA

Neste capítulo são discutidos os aspectos metodológicos considerados na realização deste trabalho. O ponto de partida é a discussão da contribuição da pesquisa para o conhecimento da área (item 4.1). Em seguida, são explicadas brevemente as diferenças entre métodos qualitativos e quantitativos (item 4.2). Posteriormente, são apresentados os métodos de procedimento mais comuns na área de Gestão e Operações e selecionado o mais adequado (item 4.3). Por fim, são detalhadas as fases da pesquisa (item 4.4)

4.1. Pesquisa como uma forma de contribuição para o conhecimento

Quando contribuições para o conhecimento existente são produzidas, o campo expande e amadurece. O conhecimento base começa a se tornar mais sólido e gradativamente podem ser observados padrões de desenvolvimento. Essa visão sobre o desenvolvimento do conhecimento mostra que o conhecimento é acumulativo, mesmo quando um novo conhecimento é destruído ou contradiz outro conhecimento existente (KARLSSON, 2009).

Assim, o desenvolvimento do conhecimento de um campo ou de uma área passa por diferentes fases que dependem do volume e da maturidade do conhecimento existente. Na fase inicial do desenvolvimento de um campo ou de uma área de conhecimento, são observadas características de estudos exploratórios. Então, após muitos estudos exploratórios com diferentes perspectivas e abordagens, uma base ou plataforma emerge e é possível dizer que o campo ou área entrou na fase descritiva. Os resultados de pesquisas descritivas tipicamente identificam componentes, padrões, sistemas e estruturas. Em seguida, pesquisadores desenvolvem modelos analíticos explicando como componentes se relacionam entre si. Seguindo a lógica, por meio de estudos causais serão atingidos conhecimentos normativos e será possível entender efeitos causais e prever efeitos de diferentes causas/medidas. As típicas saídas de pesquisas normativas podem incluir *handbooks* com *checklists* e outros tipos de ferramentas para implementação prática. Na realidade, essas saídas finais são difíceis de serem atingidas com validade razoável. Em situações nas quais não se podem definir relações de causa-efeito analíticas, são mais prováveis que se descubram relações causais em situações específicas com base em estudos de caso. (KARLSSON, 2009).

4.1.1 Contribuição do estudo

A área de conhecimento deste mestrado, aplicação da análise de falhas potenciais no processo de desenvolvimento de produtos, encontra-se na transição da fase exploratória para a descritiva. Sendo assim, como principal contribuição do estudo se propõe organizar o conhecimento nesse campo, referente aos problemas e práticas da aplicação da análise de falhas potenciais.

4.2. Métodos qualitativos e quantitativos

A delimitação do método de pesquisa passa pela definição se a abordagem será qualitativa ou quantitativa.

Abordagens quantitativas fazem uso de ferramentas matemáticas e estatísticas para coletar e gerenciar dados numéricos. Em uma pesquisa quantitativa, conceitos são examinados e testados por meio de uma clara definição de indicadores (variáveis), os quais são observáveis, tangíveis e claramente definíveis. O teste de causalidade entre variáveis é feito por meio de medições, usando protocolos e procedimentos oficiais (KARLSSON, 2009).

Em contraste, abordagens qualitativas estão extremamente relacionadas com interpretação e percepção, ao invés de identificação de uma verdade racional e objetiva. Métodos qualitativos reconhecem e levam em consideração o significado de interpretação, percepção e interação no processo de definição, coleta e análise de evidências de investigação (KARLSSON, 2009).

Embora pareça que a dicotomia qualitativa-quantitativa está puramente relacionada com a posição filosófica da pesquisa, para Karlsson (2009) é plausível e, na verdade, comum, que pesquisadores usando intensivamente a abordagem qualitativa, adotem posições positivistas ou fenomenológicas, ou seja, abordagens qualitativas não são isentas de quantificação. Podem ser atribuídos números para variáveis subjetivas e “qualitativas”.

Assim, a distinção entre os estereótipos extremos dos métodos qualitativos e quantitativos está fundamentalmente no reconhecimento da influência da interpretação e percepção subjetiva, a qual é refletida nos métodos de procedimento empregados na execução do estudo.

4.2.1 O método qualitativo aplicado ao estudo

Neste estudo a abordagem adotada é a qualitativa. Desse modo, o desenvolvimento da pesquisa é condicionado à interpretação e percepção subjetiva do pesquisador.

4.3. Métodos de procedimento

Em uma pesquisa uma questão importante, do ponto de vista técnico, é a escolha dos métodos de procedimento mais adequados para conduzi-la. Os métodos de procedimento comuns na área de gestão de operações são (KARLSSON, 2009):

- **Surveys** - Surveys são usadas para a obtenção tanto de dados quantitativos quanto qualitativos. Surveys podem ser classificadas como analíticas ou descritivas (FORZA, 2009). O tipo analítico é apropriado para investigação de uma área com substância (por exemplo, planejamento da produção). O tipo descritivo é apropriado para a identificação de características da amostra em investigação (por exemplo, impacto de regras de cronograma específicas);
- **Estudos de Caso** - Um *caso* é em efeito uma descrição detalhada de uma organização, de um incidente ou de um fenômeno (VOSS, 2009). Estudos de caso podem conter tanto dados quantitativos quanto qualitativos, podendo ser usados para desenvolver ou testar uma teoria, e empregar múltipla coleta de dados e níveis de análise (EISENHARDT, 1989). Esses estudos combinam tipicamente diferentes técnicas e ferramentas de coleta de dados, tais como, documentos, entrevistas, questionários e observações (YIN, 2005);
- **Longitudinal e Etnográfico** – Abordagens longitudinais e etnográficas estão frequentemente associados com estudos antropológicos do comportamento de indivíduos e organizações por meio de observação ou participação durante um período de tempo extenso. Os benefícios de uma abordagem longitudinal incluem a habilidade de se construir relações mais próximas com os participantes e o assunto observado ao longo do tempo (AHLSTRÖM e KARLSSON, 2009);
- **Pesquisa Ação** – Pesquisa ação envolve o pesquisador como um participante ativo no gerenciamento e resolução de problemas organizacionais. Uma característica distinta é o foco na resolução de problemas e alteração na gestão em uma organização ou grupo de organizações. A Pesquisa Ação é um processo

cíclico constituído de passos: planejar, agir, avaliar a ação e refinar o planejamento, e tem o objetivo de resolver um problema e de contribuir para a ciência. Nela o pesquisador não apenas observa o que acontece, mas atua de maneira ativa e interativa com o cliente. A pesquisa ação pode incluir todos os tipos de técnicas de coleta de dados (COUGHLAN e COGHLAN, 2009); e

- **Modelagem e Simulação** (Axiomático Quantitativo) – Pesquisa axiomática, também denominada pesquisa “racional”, representa uma abordagem “clássica” para pesquisa. Modelos matemáticos são as bases para pesquisa axiomática, a qual é desenvolvida para examinar o comportamento de sistemas sob condições controladas. Um dos objetivos principais é prover instrumentos preditivos para a operação de um sistema sob uma gama de condições (BERTRAND e FRANSOO, 2009).

4.3.1 Método de procedimento adotado

Pela análise dos métodos de procedimento comuns na área de gestão de operações, observa-se que o mais adequado para se responder as questões de pesquisa e atingir os objetivos estabelecidos é o Estudo de Caso. Isto é devido ao fato de que se busca realizar um estudo analítico de características específicas de um determinado contexto (aplicação dos métodos de análise de falhas potenciais em uma empresa) e não, por exemplo, uma generalização estatística das observações realizadas na pesquisa. Além disso, almeja-se comprovar o conteúdo levantado na revisão bibliográfica para se refletir sobre esse conteúdo.

Para a condução do estudo de caso, são adotados como referências os autores Voss (2009) e Yin (2005).

4.4. Fases da pesquisa

O presente trabalho está estruturado em cinco fases que estão ilustradas na Figura 24.

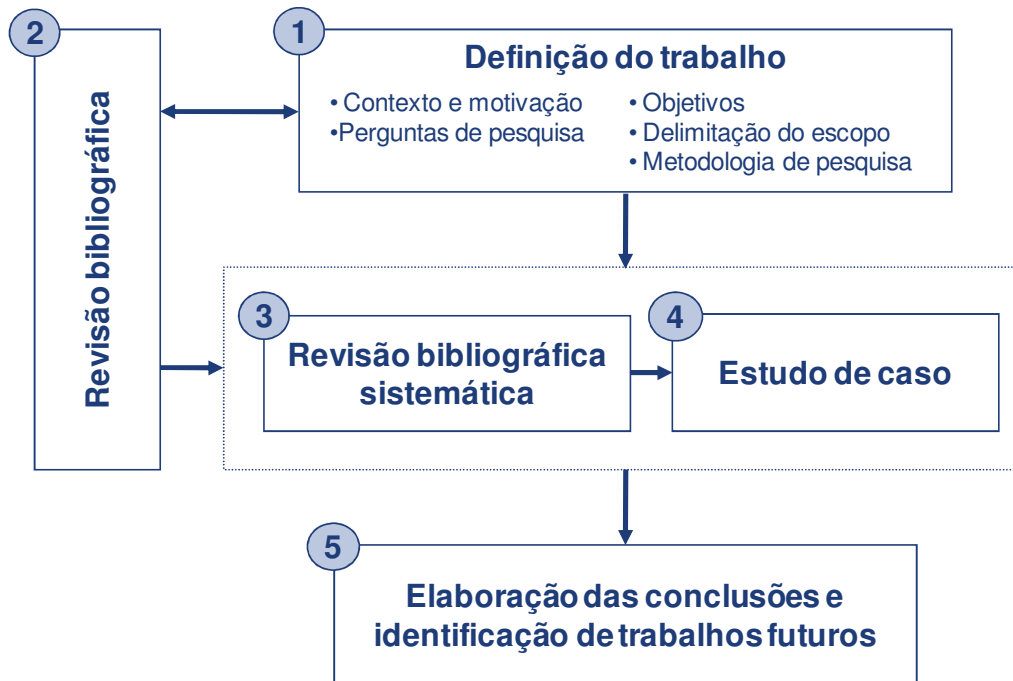


Figura 24 - Fases da pesquisa

Cada uma das fases da pesquisa é descrita detalhadamente a seguir.

4.4.1 Fase 1: Definição do trabalho

A definição do trabalho compreende: a descrição do contexto e motivação para a realização do trabalho (item 1.1), a determinação das perguntas de pesquisa e dos objetivos a serem atingidos (item 1.2), a delimitação dos setores da indústria considerados no escopo do trabalho (item 1.3), e, por fim, a escolha da metodologia científica e definição das fases da pesquisa (capítulo 4).

4.4.2 Fase 2: Revisão bibliográfica

A fase de revisão bibliográfica tem por objetivo fornecer a fundamentação necessária tanto para o desenvolvimento desta pesquisa como para a determinação de sua contribuição para a área de conhecimento (DANE, 1990). A revisão de literatura está organizada em duas partes. A primeira parte trata dos três métodos de análise de falhas potenciais FMEA, DRBFM, e FTA, e de softwares que auxiliam na execução do FMEA e do DRBFM (capítulo 2). A segunda parte discute a aplicação desses métodos no contexto do processo de desenvolvimento de produtos e apresenta uma sequência de realização do FMEA e do DRBFM (capítulo 3).

4.4.3 Fase 3: Revisão bibliográfica sistemática

A revisão bibliográfica sistemática (RBS) é um meio de identificar, avaliar e interpretar todos os trabalhos de pesquisas relevantes para uma questão de pesquisa específica, ou um tópico de uma área, ou ainda um fenômeno de interesse (KITCHENHAM, 2004), sendo possível criar generalizações (WALIA e CARVER, 2009). Esse procedimento de pesquisa é altamente estruturado, incluindo processos replicáveis, científicos e transparentes, para minimizar vieses (TRANFIELD, DEYER e SMART, 2003).

O procedimento seguido foi o proposto por Biolchini et al. (2005). O modelo desses autores é composto de três etapas, Planejamento, Execução e Análise. As etapas ocorrem de maneira iterativa, pois entre elas são previstas avaliações, e se os resultados gerados não forem aprovados, a etapa é executada novamente. Os dados operacionais são armazenados durante todo o processo. O modelo de Biolchini et al. (2005) é representado na Figura 25.

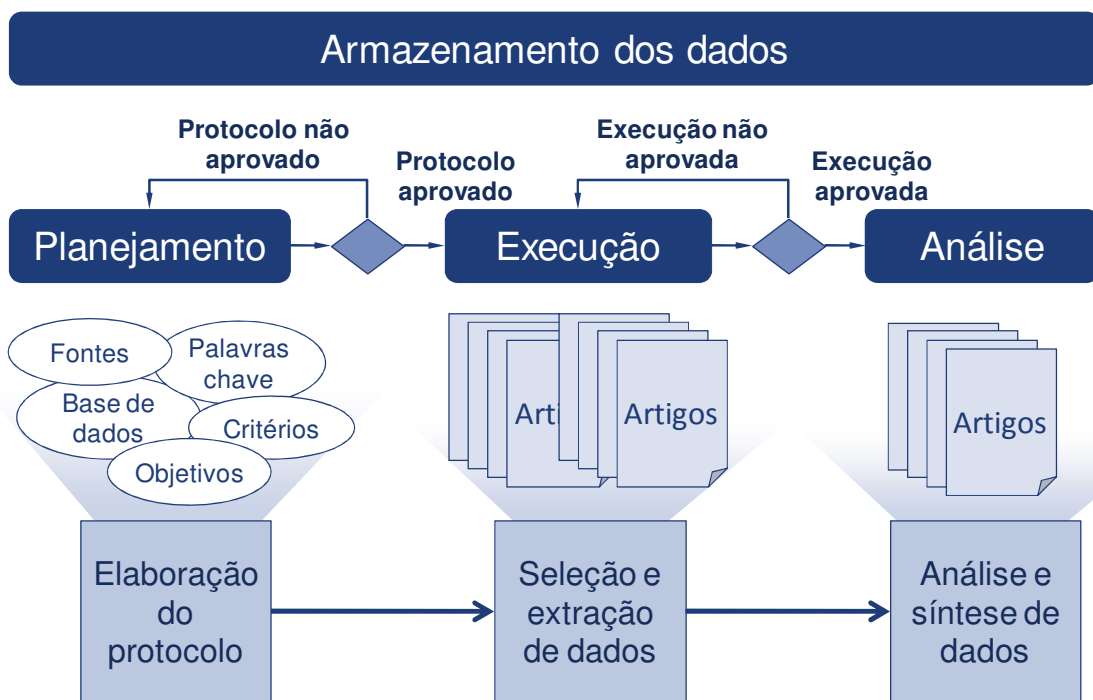


Figura 25 - Processo de Condução de Revisão Sistemática (BIOLCHINI et al., 2005)

Na etapa de **Planejamento**, os objetivos da RBS são listados e um protocolo de planejamento é definido. Esse protocolo especifica a questão central da pesquisa, as fontes de busca, os idiomas das publicações, palavras-chave para as buscas, critérios de inclusão e exclusão das publicações, métodos de seleção e estratégia de extração de informações.

Para a **Execução**, as palavras-chave são inseridas nas fontes de busca e os resultados obtidos (publicações) são selecionados de acordo com as definições do protocolo. Em seguida, são extraídas as informações relevantes dos estudos selecionados.

Finalmente, na etapa de **Análise** as informações extraídas são analisadas e sintetizadas.

Os resultados da etapa Planejamento são descritos a seguir e os resultados das etapas Execução e Análise no capítulo 5.

Planejamento

O **objetivo** da revisão bibliográfica sistemática foi identificar, analisar, sumarizar e classificar problemas e práticas da aplicação da análise de falhas potenciais descritas na literatura. Este é o primeiro objetivo específico definido para este trabalho (vide item 1.2). A **questão de pesquisa** colocada é a primeira questão de pesquisa do trabalho (vide item 1.2): “quais problemas e práticas da análise de falhas potenciais podem ser identificados na literatura?”.

As bases de dados eletrônicas selecionadas⁸ como **fontes de busca** foram: Compendex, Science Direct, Scopus, Web of Science, IEEEExplore e Emerald. Os **idiomas** escolhidos foram o inglês, por ser a língua internacionalmente usada para a escrita de trabalhos científicos, e o português, por ser a língua materna do pesquisador. Consideram-se os **tipos de trabalhos**: artigos publicados em periódicos ou em conferências.

As **palavras-chave** escolhidas para a população foram: “*FMEA*”, “*failure mode*”, “*product development*”, “*deficiency*”, “*design*”, “*shortcoming*”, “*product design*”, “*modified*”, “*integration*”, “*software*”. Das palavras-chave são derivadas as **strings de busca**: (*FMEA AND Deficiency*) OR (*FMEA AND “Product development”*) OR (*FMEA AND Design*) OR (*FMEA AND Shortcoming*) OR (*FMEA AND “Product design”*) OR (*FMEA AND Modified*) OR (*FMEA AND “Failure mode”*) OR (*FMEA AND Integration*) OR (*FMEA AND Software*). Na medida do possível, a string de busca é a mesma para todas as máquinas de busca (bases de dados eletrônicas). Quando foi necessário adaptá-las a uma máquina de busca, foram seguidas as seguintes diretrizes: (1) a string derivada deve ser logicamente equivalente à string original, ou

⁸ Essas bases de dados foram escolhidas por terem indexados periódicos e anais de eventos da área de engenharia.

(2) na impossibilidade de se manter equivalência exata, a string derivada deve ser mais abrangente para evitar perda de documentos potencialmente relevantes.

Foram definidos dois passos para o **processo de seleção dos estudos**, (1) seleção preliminar e (2) seleção final. Na a seleção preliminar deve ser feita a leitura do resumo. Caso a publicação atenda aos critérios de inclusão e de exclusão, ela é selecionada para o processo de seleção final. Na seleção final é lido o artigo completo, e os que atenderem aos mesmos critérios de inclusão e de exclusão, são selecionados para a extração de informações. Os **critérios de inclusão e exclusão** definidos foram:

- a) O texto completo das publicações deve ser acessível via *web*;
- b) A publicação deve citar pelo menos um problema do FMEA; e
- c) O artigo deve apresentar pelo menos uma prática de análise de falhas potenciais.

A **estratégia de extração de informação** foi documentar, de cada artigo selecionado, o título, autores, tipo de publicação (periódico ou conferência), local de publicação (nome do periódico ou conferência), ano de publicação, país de origem da publicação, nome da base de dados onde o trabalho foi encontrado, e os problemas e práticas citadas. Para e registrar essas informações, com exceção dos problemas, foi elaborada uma planilha Excel. Os problemas foram armazenados em outra planilha. Os cabeçalhos dessas planilhas são mostrados respectivamente nos Quadros 5 e 6.

Informações provenientes das publicações selecionadas							
Título	Autores	Tipo	Local	Ano	País	Base de dados	Descrição das Práticas

Quadro 5 - Cabeçalho da planilha para registrar informações extraídas das publicações selecionadas

Nome dos artigos	Problemas citados			
	(Descrição problema 1)	(Descrição problema 2)	(Descrição problema 3)	(Descrição problema n)
(Artigo 1)				
(Artigo 2)				
(Artigo n)				

Quadro 6 - Cabeçalho da planilha para registrar os problemas citados nas publicações selecionadas

4.4.4 Fase 4: Estudo caso

Na fase 3 da pesquisa é realizado um estudo de caso. As etapas seguidas para a condução do estudo são: (1) elaboração do protocolo de pesquisa, (2) desenvolvimento dos instrumentos de coleta de dados, (3) coleta de dados, (4) análise dos dados, e (5) elaboração de conclusões (YIN, 2005; VOSS, 2009). As duas primeiras etapas são descritas a seguir, a terceira e quarta no capítulo 6, e a quinta no capítulo 7.

Elaboração do protocolo de pesquisa

O ponto de partida do estudo é a elaboração de seu protocolo, a fim de delinear o estudo, esclarecer os principais pontos a serem estudados e guiar a coleta de dados (VOSS, 2009). O protocolo contém os **critérios de seleção do caso** (empresa), o **objetivo** do estudo, a **questão** a ser investigada, a **unidade de análise** selecionada, as **fontes de coleta de dados** e a **estratégia definida para a análise dos dados** (YIN, 2005; VOSS, 2009).

A amostra para a realização do estudo de caso necessitou atender aos seguintes **critérios**:

- a) Aplicar os métodos DFMEA, PFMEA e DRBFM; e
- b) Ser referência na aplicação desses métodos.

O **objetivo** definido para o estudo é identificar, analisar, e sumarizar, práticas de análise de falhas potenciais empregadas por uma empresa referência para se alcançar uma aplicação efetiva. A **questão** que norteou o estudo foi: “quais práticas são empregadas por uma empresa que é referência em análise de falhas potenciais?”. É importante ressaltar que o objetivo e a questão definidos para o estudo de caso são análogos respectivamente ao segundo objetivo específico e à segunda questão de pesquisa, colocados para o trabalho de mestrado (ver item 1.2)

A **unidade de análise** escolhida foi o processo de aplicação da análise de falhas potenciais em uma empresa. As **fontes de coleta de dados** selecionadas foram entrevistas. E, por fim, A **técnica analítica adotada para analisar os dados coletados** foi calcular, para cada sentença do questionário, o valor médio (μ_i), o desvio padrão (S_i), e o índice de concordância (C_i) das respostas (JAMES, DEMAREE e WOLF, 1984).

O índice de concordância (em inglês *within-group interrater reliability* [r_{wg}]) é calculado de acordo com a Equação 1. Esse índice é uma medida da concordância das respostas (notas) de um grupo de juízes na avaliação de um alvo (JAMES,

DEMAREE e WOLF, 1984). Os valores do C_i podem variar de 0,00 até 1,00. Quanto mais próximo de 1,00 o valor for, mais forte é o índice de concordância, enquanto valores próximos de 0,00 indicam uma forte falta de concordância (JAMES, DEMAREE e WOLF, 1993).

Assumindo uma distribuição uniforme, o σ_E^2 é a variância esperada devido puramente a erro aleatório. Essa variância é calculada de acordo com a Equação 2, onde A define o número de alternativas na escala de resposta (JAMES, DEMAREE e WOLF, 1984).

$$C_i = 1 - (S_i^2 / \sigma_E^2) \quad \text{Equação 1}$$

$$\sigma_E^2 = (A^2 - 1)/12 \quad \text{Equação 2}$$

Os valores médios das respostas de cada item de avaliação (μ_i) indicam pontos fortes e oportunidades para melhoria (Farris et al., 2007). Já por meio do cálculo do índice de concordância de cada item (C_i) é avaliado se existem opiniões diferentes entre os respondentes (Farris et al., 2007).

Segundo James, Demaree e Wolf (1993), ao usar o índice de concordância é necessário garantir que todos os juízes (respondentes) interpretem a escala de avaliação da mesma maneira. No caso deste estudo de caso, essa condição pode ser cumprida oferecendo treinamento prévio dos respondentes para nivelar a interpretação das questões do questionário ou selecionando respondentes experientes na aplicação do FMEA e do DRBFM. Dentre essas duas opções, opta-se pela segunda.

À parte da técnica analítica adotada, propõe-se realizar a análise por meio da interpretação do pesquisador para cada sentença dos questionários.

Desenvolvimento dos instrumentos de coleta de dados

Como instrumentos de coleta de dados foram definidos três questionários fechados: dois para avaliar a qualidade do *processo* de aplicação dos métodos DFMEA, PFMEA e DRBFM, sendo que um instrumento avalia sob a perspectiva de conformidade com práticas descritas na literatura (Instrumento 1 - vide Apêndice F) e outro sob o ponto de vista da capacidade⁹ do *processo* (Instrumento 2 - vide Apêndice G); e um para avaliar a qualidade dos *resultados* (*outputs*) gerados por esses métodos (Instrumento 3 - vide Apêndice H).

⁹ Capacidade ou habilidade de atingir objetivos e metas estabelecidas.

O Instrumento 1 foi elaborado em três passos. O primeiro foi revisar as principais referências bibliográficas usadas na Revisão de Literatura (capítulos 2, 3 e 4) – quatro livros (STAMATIS, 1995; LEVIN e KALAL, 2003; BERTSCHE, 2008; MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009), um manual (AIAG, 2008), uma norma (GM, 2005), um artigo (SHIMIZU, IMAGAWA e NOGUCHI, 2003) e o material de marketing dos softwares¹⁰ IQ-FMEA/IQ-RM da APIS (APIS, 2009) e Xfmea da ReliaSoft (RELIASOFT, 2009). No segundo passo, foram revisadas as práticas levantadas na Revisão Bibliográfica Sistemática (vide item 5.3). No entanto, apenas as diretrizes 2, 3, 6, 7, 9, 10, 38, 39, 40, 48, 49 e 51 contribuíram para a elaboração do instrumento. Então, no terceiro passo, foi consultado um especialista em gestão do processo de desenvolvimento de produtos e em análise de falhas potenciais, que opinou sobre a exclusão de alguns itens do questionário, definidos nos dois passos anteriores, e a inclusão de outros. O resultado foi um questionário que avalia como deve ser a aplicação dos métodos DFMEA, PFMEA e DRBFM, os benefícios alcançados quando esses métodos são bem aplicados, e o uso de ferramentas de apoio. Esse instrumento foi definido para ser respondido por colaboradores com conhecimento e experiência na aplicação dos métodos DFMEA, PFMEA e DRBFM.

O Instrumento 2 que avalia a capacidade do *processo* foi desenvolvido por Farris *et al.* (2007) que, por sua vez, se fundamentaram nas práticas genéricas requeridas pelo segundo nível de capacidade do CMMI-DEV (*Capability Maturity Model Integration for Development*). Um nível de capacidade caracteriza o grau de institucionalização de uma área de processo, assim, níveis de capacidade focam no crescimento da habilidade da organização de executar, controlar e melhorar seu desempenho em uma área de processo (CMMI PRODUCT TEAM, 2006). O segundo nível de capacidade do CMMI-DEV representa um processo “gerenciado”. Os níveis de capacidade consistem de práticas genéricas para uma área de processo que podem se usadas para melhorar os processos da organização associados com dada área de processo.

O CMMI-DEV prescreve metas genéricas as quais uma área de processo (tais como gestão de requisitos, gestão de projetos, etc.) deve atingir em diferentes níveis de capacidade, e também práticas genéricas que podem ser empregadas para atingir essas metas. Práticas genéricas são atividades que promovem a

¹⁰ Esses dois sistemas foram escolhidos pois possuem a funcionalidade de apoiar a condução tanto do FMEA, quanto do DRBFM.

institucionalização para garantir que os processos associados com a área de processo serão efetivos, repetíveis e melhorados (CMMI PRODUCT TEAM, 2006). As práticas genéricas requeridas para o atingimento do nível gerenciado são: estabeleça uma política organizacional, planeje o processo, forneça recursos, delegue responsabilidades, treine as pessoas, gerencie as configurações, identifique e envolva os *stakeholders* relevantes, monitore e controle o processo, avalie a aderência de maneira objetiva, revise o status com a alta gerência (CMMI PRODUCT TEAM, 2006). Farris et al. (2007) não incluiu as duas últimas práticas no instrumento, argumentando que elas se referem à atividades gerenciais que objetivam a melhoria do processo, não dimensões da qualidade do *processo*.

Desse modo, as sentenças (questões) do questionário 2 avaliam a presença das oito primeiras práticas genéricas requeridas para se atingir o segundo nível de capacidade do CMMI-DEV. Além dessas sentenças propostas por Farris et al. (2007), foi inserida uma sentença que questiona se o nível da análise de falhas realizada é suficiente. Farris et al. (2007) sugerem que esse instrumento deva ser respondido por membros de times dos métodos DFMEA, PFMEA e DRBFM, pois a avaliação seria mais acurada com o *input* desses colaboradores, e não de outros. As sentenças do questionário devem ser avaliadas em uma escala de dez pontos (1 a 10). Para cada uma delas, os respondentes especificam seu nível de percepção sobre o grau de veracidade da sentença no processo de aplicação dos métodos (1 = “Discordo plenamente,” e 10 = “Concordo plenamente”).

Por fim, o Instrumento 3 também foi proposto por Farris et al. (2007). Para elaborar as questões desse questionário Farris et al. (2007) se basearam em características de FMEAs efetivos apontadas por especialistas e descritas na literatura. Assim, a qualidade dos *resultados* da aplicação é avaliada pelo atingimento de metas específicas desses métodos. A esse questionário também foram inseridas questões adicionais referentes à aplicação do DRBFM. Algumas sentenças, por serem mais diretas e menos sujeitas a variação de interpretação, foram elaboradas para serem avaliadas em uma escala binária (sim/não), ao passo que outras sentenças foram definidas para serem avaliadas na escala de dez pontos.

O Instrumento 3 deve ser respondido por um colaborador experiente na aplicação do DFMEA, PFMEA e DRBFM na empresa mas que não seja membro do time de nenhum desses métodos. Farris et al. (2007) sugeriram essa abordagem

pois, segundo eles, um *expert* externo poderia provavelmente oferecer percepções mais objetivas e menos tendenciosas do que um membro do time.

O relato da aplicação dos três instrumentos está descrito no capítulo 6 – Resultados do estudo de caso.

4.4.5 Fase 5: Elaboração das conclusões e identificação de trabalhos futuros

Por fim, a última parte deste trabalho envolve a elaboração de conclusões sobre os dois principais resultados do trabalho, (1) os problemas e práticas obtidos na revisão bibliográfica sistemática, e (2) os achados (*findings*) do estudo de caso. Além disso, esta fase abrange a análise das contribuições da pesquisa para o campo de conhecimento e a proposição de trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir do conhecimento gerado.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

A etapa de **Execução** da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) ocorreu nos meses de Dezembro de 2008 a Julho de 2009. Essa etapa foi composta dos passos: execução da seleção e extração de informações.

Na execução da seleção os strings de busca foram inseridos nas bases de dados eletrônicas. Nesse processo foram recuperadas 2602 referências, sendo 645 da Scopus, 573 da Compendex, 489 da Science Direct, 427 da ISI Web of Knowledge, 279 da Emerald e 189 da IEEEExplore. Para apoio à manipulação e tratamento dos trabalhos recuperados foi utilizado o gerenciador de referências JabRef.

A seleção das publicações seguiu o método definido no protocolo. Desse modo, na seleção preliminar (passo 1) foram lidos os 2602 resumos, eliminando os trabalhos que nitidamente não citavam problemas ou práticas da análise de falhas potenciais. Da seleção preliminar chegou-se a 123 publicações. Então na seleção final (passo 2) os 123 trabalhos foram lidos por completo, chegando-se a 106 publicações para terem suas informações extraídas. A Tabela 4 mostra o número de publicações encontradas para cada base de dados, o número de publicações selecionadas nos dois passos da seleção e a porcentagem de publicações selecionadas em relação ao encontrado.

A lista completa das 106 publicações encontra-se no Apêndice B. Elas foram referenciadas em formato numérico para facilitar tanto a citação (também numérica) e consulta, quanto para se diferenciar das demais referências utilizadas no trabalho.

Tabela 4 - Número de artigos encontrados e selecionados

Base de dados	Publicações encontradas	Publicações selecionadas na seleção preliminar	Publicações selecionadas na seleção final	Porcentagem de publicações selecionadas por encontradas
Scopus	645	16	13	2,02 %
Compendex	573	54	50	8,73 %
Science Direct	489	19	14	2,86 %
ISI Web of Knowledge	427	7	4	0,94 %
Emerald	279	15	14	5,02 %
IEEEExplore	189	12	11	5,82 %
Total	2602	123	106	4,10 %

Para cada artigo selecionado, como estratégia de extração de informações foram registrados na planilha elaborada (veja o Quadro 5 do item 4.4.3) o título da publicação, os autores, tipo de publicação (periódico ou conferência), nome do periódico ou conferência publicado, ano de publicação, país de origem da publicação, nome da base de dados onde o trabalho foi encontrado e a descrição das práticas propostas (veja Figura 26).

Informações provenientes das publicações selecionadas								
ID	Título da publicação	Autores	Tipo	Local de publicação	Ano	País	Base de Dados	Práticas
[2]	Reliability Improvement of a Diesel Engine Using the FMETA Approach	Arcidiacono, Gabriele and Campatelli, Gianni	Periódico	Quality and Reliability Engineering International	2004	Itália	Compendex	Método FMETA (Failure mode and effect tree analysis), que baseia-se no Design Axiomático (AD) como um quadro metodológico que integra duas técnicas de confiabilidade muito difundidas: FMEA e
[8]	A revised failure mode and effects analysis model	Ben-Daya, M. and Raouf, A.	Periódico	International Journal of Quality & Reliability Management	1996	Arábia Saudita	Emerald	Método FMEA melhorado, com uma nova forma de calcular o RPN, a qual é dado maior peso ao índice Ocorrência. Os autores propuseram o método baseando-se em críticas feitas a outro método de cálculo
[14]	Fuzzy criticality assessment model for failure modes and effects analysis	Braglia, M. and Frosolini, M. and Montanari, R.	Periódico	International Journal of Quality & Reliability Management	2003	Itália	Emerald	Software para a avaliação da criticidade dos modos de falhas baseado na teoria da lógica Fuzzy. Propõe o uso de uma função de risco, que permite calcular de forma automatizada as regras da teoria Fuzzy.
[19]	Utility priority number evaluation for FMEA	Chen, Jih Kuang	Periódico	Journal of Failure Analysis and Prevention	2007	China	Compendex	O método apresentado avalia a hierarquia e a interdependência das ações de melhoria aplicando o ISM (Interpretative structural model), calcula o peso das ações por meio do ANP (Analytic network process) e por
[23]	Development of a fuzzy FMEA based product design system	Chin, K. and Chan, Allen and Yang, Jian-Bo	Periódico	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	2008	Reino Unido	Compendex	Software baseado em conhecimento que usa a lógica Fuzzy para eliminar as incertezas dos índices do FMEA. O sistema auxilia colaboradores inexperientes a realizarem a análise do FMEA na fase de
		De Vries, I. J. M. and		Annual Reliability and				Abordagem que consiste em dois caminhos

Figura 26 - Printscreen de parte da tabela de arquivamento das informações extraídas das publicações selecionadas

O registro dos problemas citados foi feito na segunda planilha elaborada (veja o Quadro 6 do item 4.4.3). Essa planilha formou uma matriz de correlação entre as publicações e os problemas citados. Na primeira coluna da matriz foram inseridos os nomes dos 106 artigos selecionados, e durante a leitura do artigo, quando era citado um problema da análise de falhas potenciais, o problema era inserido na primeira linha da matriz. Geralmente um artigo citava mais de um problema e este relacionamento foi feito inserindo o número 1 na célula que era a intersecção entre a linha que representa o artigo e a coluna que representa o problema. Dessa forma, foi possível contabilizar a frequência de aparecimento dos problemas. A Figura 27 mostra um *printscreen* de parte da matriz.

Por fim, na etapa de **Análise** as informações extraídas foram analisadas e sintetizadas. Os resultados dessa etapa são apresentados a seguir. No item 5.1, são discutidas as informações referentes à distribuição das publicações por ano, país de origem, local e tipo (periódico ou congresso). Em seguida, no item 5.2, são descritos os problemas citados nos estudos. Por fim, no item 5.3, são apresentadas as práticas encontradas.

Nome dos artigos	Problemas citados																				
	Um mesmo valor de RPN pode representar situações caracterizada por diferentes níveis de risco	Pequenas mudanças nos valores dos índices levam à grandes alterações do RPN	Presença de lacunas na escala de 1 a 1000 do RPN (números primos)	RPN não considera o tamanho do lote para atribuir a probabilidade de ocorrência da falha	Os índices são utilizados como se todos tivessem a mesma importância	O formulário do FMEA não representa todos os dados relevantes provenientes da análise	Falhas múltiplas não são consideradas	Considerado laborioso pelos membros do time	Dificuldade e de reunir o time multidisciplinar, fornecido res e consumido mais horas nas sessões do FMEA	Conflito entre os membros do time na atribuição de valores para os índices	Dependência da experiência dos membros do time	A realização de um FMEA completo e rigoroso demanda grande quantidade de tempo e recursos	Falta de entendimento da importância do FMEA	Tedioso	Realiza do tarde no PDF	Falta de uma taxonomia padrão	Falta de reuso de informações sobre falhas (FMEAs passados e falhas em campo)	FMEA utilizado para checagem e não para se propor melhorias	Os custos das ações de melhoria não são estimados	Aplicação som e ap o protótipo do sistema	
A decision support system for applying failure mode and effects analysis					1																
A decision support tool based on QFD and FMEA for the selection of																		1			
A framework for capturing and analyzing the failures due to system/component					1		1	1				1		1	1		1				1
A function-centered framework for reasoning about system failure at												1			1						
A layered approach to automated electrical safety analysis in automotive												1			1						
A new approach for evaluation of risk priorities of failure modes in FMEA	1		1		1																
A revised failure mode and effects analysis model				1	1															1	
A smart failure mode and effects analysis model								1													

Figura 27 - Printscreen de parte da matriz de relacionamento entre os problemas da análise de falhas potenciais e o nome do artigo que o citou

5.1. Distribuição das publicações

Esta análise inicial tem o objetivo de se discutir o estado geral da maturidade do conhecimento sobre problemas e práticas da análise de falhas potenciais. São considerados quatro critérios: número de publicações por ano, país de origem da publicação, local de publicação e tipo de publicação. As Figuras 28 e 29 mostram respectivamente a distribuição por ano (entre 1987 e julho de 2009) e por país dos artigos selecionados. Vale lembrar que a etapa de **Execução** ocorreu nos meses de Dezembro de 2008 a Julho de 2009.

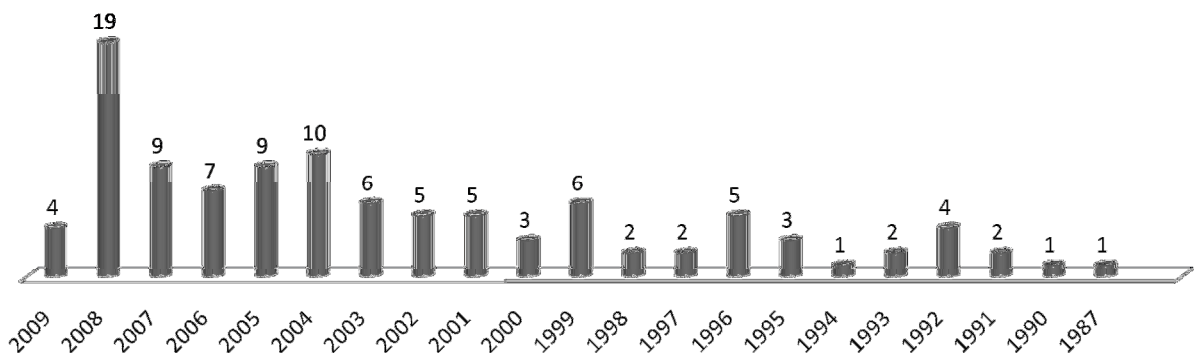


Figura 28 - Distribuição anual dos estudos selecionados

O gráfico da Figura 28 aponta uma tendência crescente do número de publicações na área, incluindo uma concentração de trabalhos entre os anos de 2004 a 2008. Apesar do número crescente de publicações sugerir aumento de maturidade, também deve ser considerado o tipo de trabalho (artigo de periódico ou artigo de congresso).

A Figura 29 mostra que, de 1987 a julho de 2009, Estados Unidos, Reino Unido e China foram os países que mais publicaram sobre o assunto. Cada um dos países da legenda “Outros” da Figura 29 teve um estudo selecionado. Esses países são: Síria, Suécia, Arábia Saudita, Holanda, França, Espanha e Áustria.

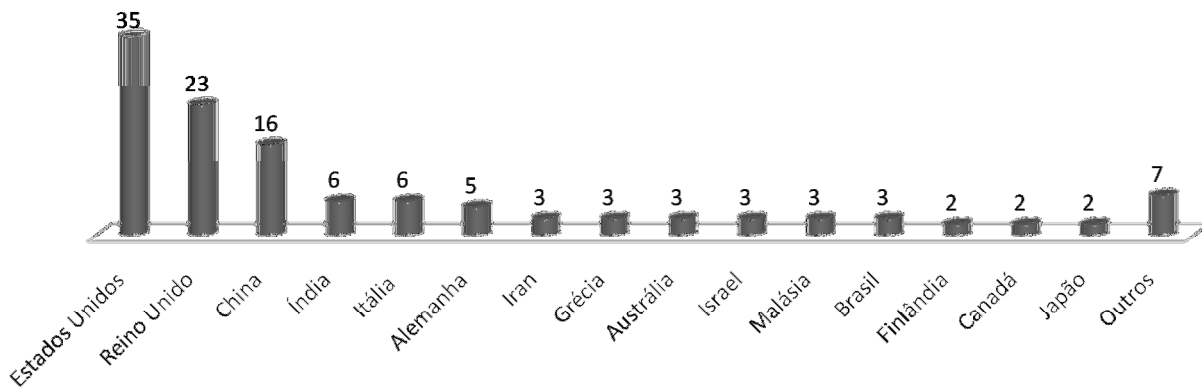


Figura 29 - Distribuição de estudos por país de origem

Dos 106 artigos selecionados, 62 foram publicados em periódicos e 44 em congressos, totalizando 54 locais (periódico ou congresso) diferentes. O percentual maior de trabalhos publicados em periódicos talvez indique uma relativa maturidade da área, corroborando com a constatação de que o número de publicações vem aumentando ao longo dos anos. Não obstante, mais de 23% do total de publicações selecionadas advêm de uma conferência (*Annual Reliability and Maintainability Symposium*).

Tabela 5 - Número de publicações por local de publicação

Local de publicação	Número de publicações	%
<i>Annual Reliability and Maintainability Symposium</i>	25	23,58
<i>International Journal of Quality & Reliability Management</i>	12	11,32
<i>Reliability Engineering and System Safety</i>	8	7,55
<i>Quality and Reliability Engineering International</i>	4	3,77
<i>Expert Systems with Applications</i>	3	2,83
<i>CIRP Annals - Manufacturing Technology</i>	2	1,89
<i>International Journal of Food Science And Technology</i>	2	1,89
<i>International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i>	2	1,89
<i>Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME</i>	2	1,89
<i>The International Symposium on Product Quality and Integrity</i>	2	1,89
Outros	44	41,51
Total	106	100

Dos 54 locais mencionados anteriormente, apenas 10 locais tiveram mais de uma publicação selecionada, totalizando 62 publicações nesses 10 locais. Os demais 44 locais tiveram uma publicação cada. Essa diversidade talvez se explique pelo fato de que a aplicação do FMEA alcança diferentes áreas e interesses dos pesquisadores (veja último parágrafo do item 2.1.1). Na Tabela 5 são mostrados os nomes dos locais de publicação, em ordem crescente de quantidade de publicações selecionadas. A lista de das fontes que tiveram uma publicação (outros) está no Apêndice C.

De acordo com o exame dos quatro critérios de análise (número de publicações por ano, país de origem da publicação, local e tipo de publicação), é possível inferir que a literatura que aborda problemas e práticas de análise de falhas potenciais está crescendo e advém de diversos campos de aplicação. Além disso, os países que mais publicaram sobre o assunto foram Estados Unidos, Reino Unido e China, e a conferência e os periódicos que apresentaram mais artigos foram respectivamente a *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, o *International Journal of Quality & Reliability Management* e o *Reliability Engineering and System Safety*.

5.2. Problemas

Da leitura do conteúdo das 106 publicações, encontrou-se 37 problemas da análise de falhas potenciais. Foi desenvolvida uma matriz que relacionava os problemas com as publicações, podendo ser calculado em quantos dos 106 artigos um problema aparecia (veja Figura 27). Esses valores, em forma de frequência, são apresentados na Tabela 6.

Percebeu-se que alguns dos 37 problemas referiam-se a um mesmo tópico e possuíam características similares. Assim, elaborou-se 9 classes que poderiam agrupar problemas de um mesmo assunto. As classes propostas são: Definição do risco, Recursos, Integração PDP, Temporal, Cultura organizacional, Gestão de informações, Procedimentos, e Comportamental.

A classe **Definição do risco** (10 problemas) trata de problemas referentes ao cálculo e a conceitos que envolvem o RPN e os índices do FMEA: Severidade, Ocorrência e Detecção. A classe **Recursos** (1 problema) refere-se à alocação de recursos suficientes para a execução da análise de falhas potenciais (materiais,

apoio de um facilitador, apoio de um patrocinador, etc.). **Integração PDP** (2 problemas) refere-se à integração da aplicação dos métodos de análise de falhas potenciais com atividades/métodos/pessoas do processo de desenvolvimento de produtos. A classe **Temporal** (2 problemas) é composta de problemas associados ao momento de aplicação de métodos de análise de falhas potenciais no ciclo do PDP. A classe **Cultura organizacional** (4 problemas) considera valores e normas compartilhadas pelos colaboradores que prejudicam a efetividade da aplicação. **Gestão de informações** (4 problemas) compreende problemas de uso/registro/reuso de conhecimentos sobre falhas e ações de melhoria. A classe **Procedimentos** (11 problemas) refere-se a limitações associadas à execução das tarefas e atividades (operações) dos métodos de análise de falhas potenciais. Finalmente, a classe denominada **Comportamental** (3 problemas) é composta de problemas associados aos comportamentos e atitudes dos colaboradores envolvidos na aplicação de métodos de análise de falhas potenciais.

A Tabela 6 mostra os 37 problemas, ordenados por frequência de aparecimento nas 106 publicações, e sua respectiva classe.

Tabela 6 - Lista dos problemas ordenados pela frequência de aparecimento nos estudos selecionados da revisão sistemática

Classe	Problema	Frequência
Definição do risco	Os valores dos RPNs (<i>Risk Priority Number</i> – Índice de Prioridade de Risco) do FMEA não são precisos.	34,91 %
Recursos	A realização de um FMEA completo e rigoroso demanda grande quantidade de tempo e recursos.	31,13 %
Integração PDP	A aplicação de métodos de análise de falhas potenciais não é integrada com outros métodos e atividades do PDP.	24,53 %
Temporal	Realizado tarde no PDP.	21,7 %
Definição do risco	Os índices Severidade, Ocorrência e Detecção do FMEA são utilizados como se todos tivessem a mesma importância.	20,75 %
Definição do risco	Um mesmo valor de RPN pode representar situações caracterizadas por diferentes níveis de risco.	19,81 %
Comportamental	A execução da análise de falhas potenciais é considerada tediosa pelos praticantes.	16,04 %
Definição do risco	Crítérios qualitativos são usados como quantitativos.	15,09 %
Gestão de informações	Falta de reuso de informações sobre falhas (FMEAs passados e falhas em campo).	14,15 %
Cultura organizacional	A execução da análise de falhas potenciais é considerada laboriosa pelos membros do time.	12,26 %
Procedimentos	Falhas múltiplas não são consideradas.	11,32 %

Continua...

Continuação...

Classe	Problema	Frequência
Comportamental	Dependente da experiência dos membros do time.	10,38 %
Gestão de informações	Dificuldade em definir ações de melhoria adequadas, considerando a viabilidade (restrições), a chance de sucesso (redução do RPN), e os impactos desfavoráveis (nas pessoas, produto, processo, ambiente).	9,43 %
Definição do risco	Dificuldade em estimar os valores para os índices Severidade, Ocorrência e Detecção do FMEA.	8,49 %
Gestão de informações	Falta de uma taxonomia padrão.	8,49 %
Procedimentos	Os custos das ações de melhoria não são estimados.	7,55 %
Procedimentos	Os custos de falhas que chegariam aos clientes não são estimados.	7,55 %
Definição do risco	Presença de lacunas na escala de 1 a 1000 do RPN do FMEA.	6,6 %
Gestão de informações	Dificuldade de se obter dados relevantes sobre o projeto do produto/processo.	6,6 %
Procedimentos	O formulário do FMEA não representa todos os dados relevantes da análise.	6,6 %
Definição do risco	Os índices numéricos (Severidade, Ocorrência e Detecção) do FMEA não são expressivos (não expressam a realidade).	5,66 %
Cultura organizacional	Realizada somente por questões contratuais.	5,66 %
Definição do risco	Pequenas mudanças nos valores dos índices (Severidade, Ocorrência e Detecção) do FMEA levam a grandes alterações do RPN.	3,77 %
Temporal	Aplicada somente após o protótipo ser construído e testado.	3,77 %
Cultura organizacional	Utilizada para checagem e não para se propor melhorias.	3,77 %
Comportamental	Conflito entre os membros do time na atribuição de valores para os índices do FMEA.	3,77 %
Procedimentos	Os níveis de complexidade do item de análise não são considerados.	3,77 %
Integração PDP	Dificuldade de reunir o time multidisciplinar, fornecedores, e consumidores nas sessões de análise de falhas potenciais.	2,83 %
Procedimentos	Repetitiva, já que deve estar sempre atualizada.	2,83 %
Procedimentos	Não são levados em conta aspectos ambientais na proposição de ações de melhorias.	2,83 %
Definição do risco	O RPN do FMEA não considera o tamanho do lote para atribuir a probabilidade de ocorrência da causa da falha.	1,89 %
Cultura organizacional	Falta de entendimento da importância da análise de falhas potenciais.	1,89 %
Definição do risco	O índice de Severidade do FMEA é definido pelo projetista e não pelo consumidor.	0,94 %

Continua...

Continuação...

Classe	Problema	Frequência
Procedimentos	Falta de agrupamento de modos de falhas (mecânica, elétrica, etc.).	0,94 %
Procedimentos	Não existem critérios para selecionar itens (sistemas, subsistemas componentes, operação de fabricação ou montagem) que serão analisados.	0,94 %
Procedimentos	Não considera (previne) falhas originadas em diferentes departamentos da organização.	0,94 %
Procedimentos	Não define modos de falhas de sistemas dependentes de tempo-real, tais como falhas que ocorrem muito cedo ou muito tarde em sistemas de segurança (marca-passos, <i>airbags</i> , etc.).	0,94 %

No Apêndice D são apresentados em quais artigos cada um dos 37 problemas apareceram.

5.3. Práticas

Na análise do conteúdo das 106 publicações, também foram encontradas 161 práticas¹¹ de análise de falhas potenciais. Essas 161 práticas foram classificadas em Abordagens, *Frameworks*, Métodos, Ferramentas, Softwares e Diretrizes. Os conceitos adotados para definir essas classes de práticas são:

- Abordagem: maneira ampla (alto nível) de focar um assunto (HOUAISS, 2007);
- *Framework*: estrutura conceitual composta por elementos que apóiam o desenvolvimento de algo (HAWKINS, 1994; LDOCE, 2009);
- Método: procedimento ou meio articulado na forma de um conhecimento específico usado para resolver um problema específico (fim) (ENGWALL, KLING e WERR, 2005);
- Ferramenta: ferramentas são usadas para apoiar a execução de tarefas (solução de problemas) e de métodos (ENGWALL, KLING e WERR, 2005);
- Software: é uma sequência de instruções executada por um computador. Essa sequência segue padrões específicos que resultam em um comportamento desejado (Wikipédia, 2010);

¹¹ Vala ressaltar que, neste trabalho, “prática” é o termo genérico adotado para designar qualquer técnica, método, ferramenta, procedimento ou um processo que pode melhorar os processos de negócio de uma empresa (JARRAR e ZAIRI, 2000).

- Diretriz: recomendação a qual determina o curso (direção) de uma ação. Usualmente a diretriz transfere o conhecimento de um especialista para um praticante (ENGWALL, KLING e WERR, 2005).

A Figura 30 mostra a distribuição das 161 práticas em cada classe. Em seguida é apresentado o nome de cada prática seguido das publicações em que ela apareceu (citação numérica), lembrando que a referência bibliográfica da publicação pode ser consultada no Apêndice B. No Apêndice E encontra-se a descrição das práticas.

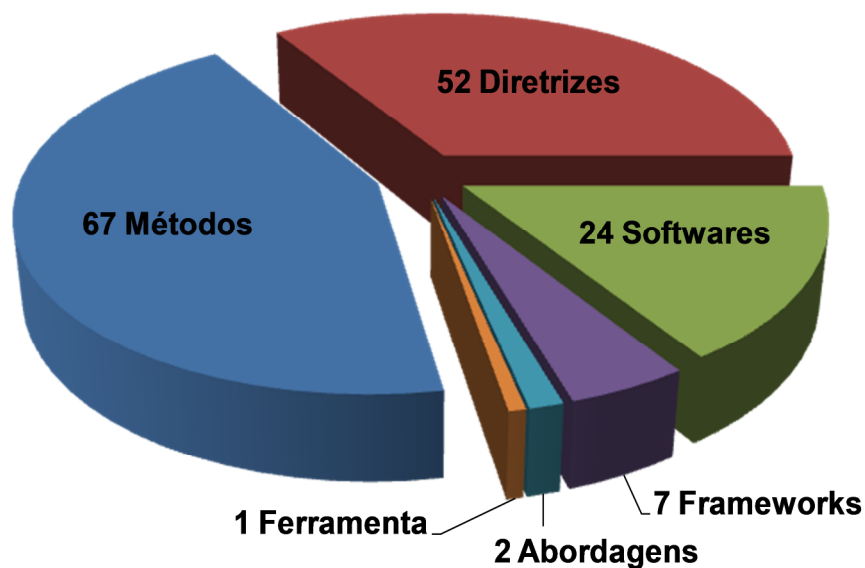


Figura 30 - Quantidade de Abordagens, Ferramentas, Frameworks, Métodos, Softwares e Diretrizes encontradas na revisão sistemática

Ferramenta:

1. Ferramenta (planilha Excel) de apoio a tomada de decisão baseada no QFD e no FMEA, que considera pessoas, tecnologia e organização [1].

Abordagens:

1. Abordagem chamada ROMDA (*Reliability Optimization Method through Degradation Analysis*) que adota o FMEA para prever a confiabilidade de um produto [26].
2. Abordagem chamada FuRBaR (*Fuzzy Rule-Based Bayesian Reasoning*) para priorizar falhas no FMEA [103].

Frameworks:

1. *Framework* para capturar e analisar modos de falha devido a interações entre sistemas/componentes [61].

2. *Framework* para raciocínio falhas em sistema em múltiplos níveis de abstração [77].
3. *Framework* que modela o comportamento de um sistema para análise de risco e confiabilidade [84].
4. *Framework* que usa *fuzzy methodology* (FM) para prever o comportamento de sistema [85].
5. *Framework* para prever e atualizar o índice de ocorrência baseado na lógica *Fuzzy* [89].
6. *Framework* para reusar conhecimentos do FMEA por meio de modelagem de conhecimentos [92].
7. *Framework* iFMEA (*intelligent* FMEA) [95].

Software:

1. Software baseado no processo de raciocínio causal para automatizar a análise do FMEA [7].
2. Software de confiabilidade e análise de modos de falhas que adota a lógica *fuzzy*, baseado no procedimento do FMEA [14].
3. Software chamado *Enhanced* FMEA (E-FMEA) [21].
4. Software FMEA baseado em conhecimento que usa a lógica *fuzzy* [23].
5. Software para automatizar o FMEA de componentes que sofrem mudanças incrementais [29].
6. Software para gerar automaticamente árvores de falhas (FTA) e tabelas de FMEA que usa a modelagem *Multi-level Flow Modeling* (MFM) [38].
7. Software de manutenção virtual para apoiar o FMEA [43].
8. Software *web* de apoio à elaboração do FMEA [46 e 47].
9. Projeto de uma base de dados relacional para armazenar informações do FMEA e automatizar o processo de aquisição informações [54].
10. Software para auxiliar a aplicação do FMEA [56].
11. Software de simulação numérica de modos de falhas [58].
12. Software FMEA *Streamlining* [59].
13. Software para automatizar todo o ciclo de desenvolvimento de sistemas de circuitos elétricos/eletrônicos [60].
14. Software para automatizar o FMEA [62].
15. Software FMES (*Failure Modes and Effects Simulation*) [63].
16. Software para aplicar o FMEA de maneira incremental [69].

17. Software para automatizar a análise de segurança de projetos elétricos [70].
18. Software que combina raciocínio funcional e estrutural para a análise da segurança de projetos elétricos [71].
19. Software para automatizar o FMEA para análise de falhas múltiplas [72].
20. Software AutoSteve para análise de falhas múltiplas [73].
21. Software para automatizar a aplicação do FMEA em circuitos elétricos chamado FLAME [74].
22. Software para o FMEA incremental automatizado [94].
23. Software baseado em conhecimento para a análise de modos de falha e efeitos [101].
24. Software de raciocínio baseada em modelo [106].

Métodos:

1. Método FMETA (*Failure Mode and Effect Tree Analysis*) [2].
2. Método estatístico de clusterização para identificar falhas potenciais [3].
3. Método que integra FMEA, diagrama de Ishikawa, análise de Pareto com o método HACCP (*Hazard Analysis Critical Control Point*) [4, 5 e 6].
4. Método melhorado de FMEA para o calculo do RPN .
5. Método para fechar a lacuna no desenvolvimento de hardware e software usando o FMEA .
6. Método *Expanded* FMEA (EFMEA) [10].
7. Método *Bouncing Failure Analysis* (BFA) [11].
8. Método para a avaliação da priorização do RPN na análise do FMEA [12].
9. Método para priorização de modos de falhas usando a lógica *fuzzy* [13].
10. Método chamado *Priority-Cost* FMECA (PC-FMECA) [15].
11. Método que usa a teoria *Grey* para calcular o RPN do FMEA [16].
12. Método que usa a lógica *fuzzy* combinada com a teoria *Grey* para calcular o RPN do FMEA [17].
13. Método chamado *Design Process* FMEA [18].
14. Substitui o RPN do FMEA pelo UPN (*Utility Priority Number*) [19].
15. Programação linear *fuzzy* aplicada aos métodos QFD e FMEA [20].
16. Método FMEA modificado que identifica riscos de falhas que têm a mesma causa [22].
17. Método FMEA que usa a abordagem *Evidential Reasoning* (ER - raciocínio por evidência) [24].

18. Método *Timed* FMEA [25].
19. Método Total FMEA (TFMEA) [27].
20. Método chamado *Fuzzy Utility Theory based* FMEA (FUT-based FMEA) [28].
21. Método que usa o *Overall Equipment Efficiency* (OEE) para melhorar a aplicação do FMEA [30].
22. FMEA para projeto baseado em risco [31].
23. Método para integração do FMEA com o QFD [32].
24. Método para o cálculo do RPN sem transformar valores qualitativos em quantitativos [33].
25. Método FMEA que usa digrafos e matrizes [34].
26. Método para promover interações entre os métodos QFD e FMEA [35].
27. Método FMEDA (*Failure Mode Effect and Diagnostic Analysis*) [36].
28. Método FMEA aplicado para melhorar a confiabilidade de sistemas eletrônicos [37].
29. Método *probabilistic* FMEA (pFMEA) [39].
30. Método que usa o sistema de inferência *fuzzy* (*fuzzy inference system*) no FMEA para estimar o risco a partir de opiniões de especialistas sobre a quantificação de variáveis linguísticas [40].
31. Método FMEA com aspectos financeiros de risco e o modelo ABC (*Activated-Based Cost*) [41].
32. Método para a análise de severidade baseado na linguagem UML [42].
33. Método que combina o FMEA e o FAHP (*Fuzzy Analytic Hierarchy Process*) para avaliar riscos de componentes verdes [44 e 45].
34. Método *Group-based Failure Effects Analysis*(GFEA) [48].
35. Método FMEA melhorado [49].
36. Método *Smart* FMEA [50].
37. Método *scenario-based* FMEA [51].
38. Método para analisar modos de falhas usando FTA [52].
39. Método que integra o QFD e o FMEA [53].
40. Método *Bayes Networking* FMEA (BN-FMEA) [55].
41. Método para modelar o conhecimento e realizar diagnóstico sobre falhas usando *Polychromatic sets theory* [57].
42. Método que aplica *Fuzzy Cognitive Maps* (FCM) no FMEA [64 e 65].

43. Método qualitativo de integração da qualidade assegurada e da predição da confiabilidade por todo o ciclo de desenvolvimento de produto [66].
44. Método mFMEA (*multiple Failure Mode and Effects Analysis*) [67].
45. Método FMEA que usa a lógica probabilística *approximate reasoning* [68].
46. Método FMEA aplicado em um sistema de decisão [75].
47. Método *Life Cost-Based* FMEA [76].
48. Método para priorizar falhas no FMEA [78].
49. Método FMEA aplicado no gerenciamento da gestão técnica de riscos no PDP [79].
50. Método alternativo para reduzir custos de preparação do FMEA [80].
51. Método de re-priorização de modos de falhas do FMEA para proposição de ações corretivas [81].
52. Método que integra o FMEA e o modelo de Kano [82].
53. Método FMEA que usa linguagem *fuzzy* de modelagem [83].
54. Método *Inter-Crossing* [86].
55. Método *Function-Failure Design Method* (FFDM) [87].
56. Método para simplificar o FMEA baseado na lógica *fuzzy* [88].
57. Método para implementar o FMEA em um ambiente colaborativo [90].
58. Método para geração do FMEA no projeto conceitual [91].
59. Método FMAG (*for FMEA generation*) [93].
60. Método FMEA invertido [96].
61. Método que integra FMEA e FTA no processo de especificação de requisitos [97].
62. FMEA usado na avaliação de custos de garantia [98].
63. Método *cost-oriented* FMEA [99].
64. Avaliação de risco no FMEA usando média geométrica ponderada *fuzzy* [100].
65. Método para a aplicação do FMEA baseado na lógica *fuzzy* [102].
66. Método FMEA baseado na teoria *fuzzy* [104].
67. Método que combina o conceito de *green design* com os métodos FMEA e TRIZ [105].

Diretrizes:

1. Integrar os métodos FMEA e QFD [1, 18, 20, 32, 35 e 53].
2. Integrar os métodos FMEA e FTA [2, 11, 42, 52, 67 e 97].

3. Usar dados de falhas em testes e em campo nas análises de falhas [3, 26, 53, 79, 87, 91 e 93].
4. Usar análise de clusters para identificar modos de falha de componentes [3 e 61].
5. Integrar o design axiomático e o FMEA [2].
6. Reaproveitar conhecimentos gerados em análise de falhas passadas para utilizá-los em novas análises [57, 58, 62, 91, 92, 93 e 101].
7. Usar taxonomia padrão [22, 87 e 101].
8. Aplicar o método HACCP (*Hazard Analysis Critical Control Point*) em conjunto com o FMEA [4, 5 e 6].
9. Aplicar o diagrama de Ishikawa em conjunto com o FMEA [4, 5 e 6].
10. Usar a análise de Pareto para priorizar os RPNs [4, 5 e 6].
11. Usar um software para modelar e simular o sistema para capturar modos de falhas, efeitos e causas [63, 64, 65, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 77, 94, 95 e 106].
12. Automatizar a aplicação do FMEA usando processo de raciocínio causal (*causal reasoning process*) [7].
13. Priorizar falhas para a proposição de ações de melhoria utilizando a lógica *fuzzy* [13, 14, 17, 20, 23, 28, 40, 44, 45, 61, 64, 68, 75, 83, 84, 85, 88, 89, 100, 102 e 104].
14. Dar maior peso ao índice Ocorrência [8].
15. Validar modos de falhas críticos e a resposta do sistema a falhas por meio de simulações [9].
16. Ordenar, do menor para o maior, os valores dos RPNs em um gráfico *Scree Plot* e priorizar os RPNs a serem atacados que comporem a inclinação mais acentuada [10].
17. Para um mesmo modo de falha, ranquear por viabilidade as ações de melhoria e selecionar a mais adequada [10].
18. Retirar o índice Detecção [12].
19. Segmentar a severidade nas classes segurança, operacionalidade e estética [12].
20. Calcular o custo que as falhas poderiam incorrer [12, 15, 28, 41, 42, 51, 76 e 98]
21. Usar a teoria *Grey* para calcular o RPN [16, 17, 68 e 84].
22. Considerar como possíveis modos de falhas para o FMEA erros advindos das áreas: conhecimento, análise, comunicação, execução, mudança e organização [18].

23. Avaliar a interdependência das ações de melhoria para decidir a ordem de implementação [19].
24. Integrar o FMEA com as rotinas de testes de CAD¹²/CAM¹³ [21, 61 e 70].
25. Identificar falhas originadas pela mesma causa [2, 11, 22, 38, 52, 67, 72 e 73].
26. Priorizar falhas para a proposição de ações de melhoria utilizando a abordagem *Evidential Reasoning* (ER - raciocínio por evidência) [24].
27. O FMEA deve ser aplicado por todos os departamentos da empresa [27].
28. Se todas as possíveis falhas de um subsistema conduzem ao mesmo efeito, então é aceitável considerar o subsistema como um único componente com modos de falhas amplamente definidos [31].
29. Se o efeito final de falhas dentro de um subsistema depende de qual componente é considerado, então o subsistema deve ser quebrado em componentes mais específicos [31].
30. A resolução dos índices de severidade e ocorrência deve ser entre 3 a 5 [31].
31. Antes de se iniciar o FMEA, deve ser definido o nível de risco considerado inaceitável [31].
32. Quando for identificado que uma única falha pode causar uma falha simultânea de vários componentes de um sistema, deve-se propor o uso de redundâncias, isto é, componentes que têm a mesma função mas seus princípios de funcionamento são diferentes [37].
33. Integrar os métodos FMEA e FFA (*Functional Failures Analysis*) [42].
34. Usar modelos virtuais para apoiar a análise do FMEA [43].
35. Antes de iniciar o FMEA, derivar um diagrama de bloco funcional ou hierárquico, identificando claramente a sequência do fluxo funcional e dependências ou independências das funções e operações. Um diagrama na forma de árvore é particularmente recomendado [49].
36. Antes de iniciar o FMEA, identificar o nível o qual a análise deve iniciar. O grau de detalhes depende do estágio que as análises são conduzidas [49].
37. Capturar modos de falhas devido a interações entre componentes de um módulo [61].
38. Definir o índice de severidade sob o ponto de vista do cliente [82].

¹² Computer-Aided Design

¹³ Computer-aided manufacturing

39. Considerar o FMEA como um documento vivo, que deve ser atualizado sempre que o produto é modificado, um novo modo de falha é identificado, ou um projeto a prova de falhas é implementado [82 e 90].
40. Usar um *checklist* de causas de falhas [68].
41. Todas as informações incluídas no FMEA devem conter detalhes suficientes para que as partes envolvidas sejam capazes de executar ações específicas e de vinculá-las com a parte responsável na cadeia de suprimentos [90].
42. Deve ser especificado um valor quantificável (que possa ser medido) para uma função, para que as partes envolvidas da cadeia de suprimentos possam ter um entendimento claro e uma interpretação comum da função [90].
43. As especificações de engenharia devem estar presentes detalhadamente no FMEA, as quais incluem requisitos funcionais, de confiabilidade, de segurança e de durabilidade do sistema, subsistema e componentes [90].
44. O relatório do FMEA deve ser parte do pacote de engenharia (desenhos, especificações de testes, etc.) que é compartilhado com toda cadeia de suprimentos [90].
45. Os colaboradores envolvidos com o projeto e manufatura do produto devem discutir, revisar e atualizar os relatórios do FMEA, em diferentes momentos do processo de desenvolvimento do produto [90].
46. Os times de FMEA da cadeia de suprimentos envolvidos devem concordar com uma escala comum para a atribuição do índice de detecção [90].
47. Estabelecer um processo que garanta a inclusão de entradas dos fornecedores e clientes para o desenvolvimento do DFMEA [90].
48. Deve ser estabelecida uma ligação entre DFMEA e PFMEA [90].
49. Usar o DFMEA para gerar o plano de teste e verificação de projeto [90].
50. Usar o PFMEA para gerar o plano de controle do processo [90].
51. Garantir que os colaboradores entendam com utilizar o FMEA em seu trabalho [90].
52. Integrar os métodos FMEA e TRIZ [105].

6. ESTUDO DE CASO

Com base nos critérios apontados para seleção do caso, foi selecionada uma unidade de negócio da divisão tecnologia automotiva de uma empresa multinacional de origem Alemã. Sediada no país há 56 anos e com quatro unidades fabris no Brasil, sendo duas delas no interior do estado de São Paulo, a empresa conta, além da divisão de tecnologia automotiva, com as divisões corporativas de tecnologia industrial, bens de consumo e tecnologia de construção.

A unidade de negócio selecionada é líder de mercado nos segmentos que atua, seu processo de desenvolvimento de produtos é voltado à robustez, sua meta é alcançar o nível de falhas de seus produtos em zero PPM (partes por milhão) no prazo de garantia, e todas as melhorias incrementais são implementadas utilizando o DRBFM. Na ocasião do estudo, a unidade de negócio se preparava para auditoria de certificação nível 2 do CMMI-DEV. Por esses motivos ela foi considerada um benchmark. Assim, a escolha dessa unidade de negócio está de acordo com os objetivos do trabalho (veja item 1.2).

Nesta seção, primeiro, são apresentados os resultados da avaliação da qualidade do *processo* de aplicação dos métodos FMEA e DRBFM (item 6.1) e, em seguida, os resultados da avaliação da qualidade dos *resultados* da aplicação dos métodos (item 6.2).

6.1. Avaliação da qualidade do *Processo* de aplicação dos métodos FMEA e DRBFM

A avaliação da qualidade do *processo* de aplicação dos métodos FMEA e DRBFM foi feita sob a perspectiva da **conformidade** com práticas descritas na literatura e da **capabilidade**, aplicando-se respectivamente os Instrumentos 1 e 2, conforme definido no item 4.4.3 do capítulo da metodologia.

O Instrumento 1 foi respondido pela moderadora de FMEA e pelo Engenheiro de Métodos e Processos da unidade de negócio avaliada. No entanto, devido a limitações de tempo, algumas questões do instrumento foram respondidas pela moderadora e outras pelo engenheiro. De acordo com as respostas, ambos respondentes percebem que a aplicação dos métodos FMEA e DRBFM na unidade de negócio está de acordo com as práticas que a literatura prescreve. As respostas dessa seção do Instrumento 1 são apresentadas na Tabela 7. As questões de 1 a 11 foram respondidas pela moderadora FMEA e a 12, 13, 14 e 15 pelo engenheiro de

métodos e processos, que também respondeu as questões 22, 23, 24 e 25 (veja Tabela 9).

Tabela 7 - Respostas relacionadas à conformidade com práticas da literatura (questões sim/não)

Nº	Item de avaliação	Resposta	
		Sim	Não
1	O DRBFM é aplicado quando um projeto (<i>design</i>)/requisito é alterado (mudança de engenharia, condições de uso do produto, legislação, etc.).	X	
2	O DRBFM é aplicado regularmente pelos engenheiros nas atividades diárias e são realizadas revisões de projetos (<i>design reviews</i>) por um time de especialistas.	X	
3	O DFMEA é aplicado em projetos de produto (<i>designs</i>) e tecnologias totalmente novos.	X	
4	O PFMEA é aplicado em projetos de produto e tecnologias totalmente novos.	X	
5	Nas revisões de projeto (<i>design reviews</i>) do DRBFM é incluído na equipe um especialista que não tenha familiaridade com o projeto do produto em análise.	X	
6	O DFMEA e o DRBFM são integrados um com o outro.	X	
7	O DFMEA/DRBFM é integrado ao plano de testes (verificação e avaliação).	X	
8	O documento do DFMEA/PFMEA é considerado um documento vivo, isto é, a aplicação do DFMEA/PFMEA é contínua no processo de desenvolvimento de produto e não é considerada como sendo um evento único (é atualizado sempre que o produto/processo é modificado, um novo modo de falha é identificado, ou uma nova ação de melhoria é implementada).	X	
9	DFMEAs/PFMEAs anteriores de produtos/processos semelhantes são usados como ponto de partida para novos DFMEAs/PFMEAs.	X	
10	Falhas ocorridas em campo e definidas em testes são incorporadas nas análises de DFMEA/PFMEA.	X	
11	A terminologia usada para descrever um item do formulário DFMEA/PFMEA/DRBFM (modos de falha, efeitos de falha, causas de falha, etc.) é padronizada.	X	
12	O PFMEA é completo de maneira que todos os passos do processo são considerados.	X	
13	Os pontos preocupantes apresentados pelo líder do time são cautelosamente revisados pelos especialistas no início das sessões de revisões de projeto do DRBFM, evitando qualquer omissão.	X	
14	As sessões de revisão de projeto do DRBFM são focadas nos pontos chave a serem discutidos.	X	
15	Por meio de discussão entre especialistas de diversas áreas, nas revisões de projetos do DRBFM, são descobertos vários problemas que não iriam ser notados pelos projetistas.	X	

Por outro lado, ainda segundo a moderadora, a aplicação dos métodos de análise de falhas potenciais não contribui totalmente para a redução do tempo de desenvolvimento do produto e do número de protótipos físicos necessários para se lançar o produto (discordou levemente das sentenças 19 e 20), contrariando o que é

descrito na literatura. No entanto, na opinião dela, a aplicação dos métodos é efetiva, no sentido de trazer o benefício de se reduzirem falhas externas (item 17) e internas (item 18) e custos de falhas (item 16). A Tabela 8 mostra as respostas dessa seção do Instrumento 1.

Tabela 8 - Respostas relacionadas aos benefícios advindos da aplicação dos métodos (escala 1 a 10)

Nº	Item de avaliação	Nota
16	A taxa e os custos de falhas são reduzidos como resultado da aplicação desses métodos.	8
17	Reclamações de clientes e recalls são reduzidas como resultado da aplicação desses métodos.	8
18	A qualidade interna é melhorada, ou seja, defeitos, refugos, retrabalhos, etc. são reduzidos como resultado da aplicação desses métodos.	8
19	A aplicação desses métodos ajuda a reduzir o tempo do ciclo de desenvolvimento.	5
20	A aplicação desses métodos ajuda a reduzir o número de protótipos.	5
21	Se o DRBFM não fosse feito, sérios problemas não seriam notados.	10

Práticas relacionadas à realização de treinamento e trabalho em equipe foram bem avaliadas pelo o engenheiro de métodos e processos. Essas respostas são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Respostas referentes a treinamento e trabalho em equipe (escala 1 a 10)

Nº	Item de avaliação	Método	Nota
22	As discussões são profundas e todos os membros do time contribuem ativamente.	DFMEA	7
		PFMEA	7
		DRBFM	10
23	O líder do time é bem preparado para conduzir/facilitar as sessões de análise de falhas potenciais.	DFMEA	8
		PFMEA	8
		DRBFM	10
24	Os projetistas e processistas aceitam receber críticas do seu trabalho pelos membros do time.	DFMEA	8
		PFMEA	8
		DRBFM	10
25	Não existe corporativismo entre os membros do time.	DFMEA	10
		PFMEA	10
		DRBFM	10

A última seção do Instrumento 1 foi respondida pela moderadora e tratou do uso de ferramentas para auxiliar o FMEA e o DRBFM, analisando em detalhes a

utilização de software e do FTA (*Fault Tree Analysis* – Análise da Árvore de Falhas). As Tabelas 10, 11 e 12 mostram respectivamente as ferramentas e sua respectiva frequência de utilização, os itens de avaliação da aplicação do software de apoio à aplicação do FMEA e do DRBFM, e os itens de avaliação da aplicação do FTA.

Pela análise da Tabela 10, nota-se que a unidade de negócio não utiliza o DFMEA, PFMEA e o DRBFM como métodos isolados, ou seja, sem dependências (*standalone*) com outras técnicas aplicadas para identificar falhas potenciais. Além disso, é utilizado um software de apoio à realização desses métodos, o IQ-RM da APIS (APIS, 2009).

Para avaliar se os benefícios do uso do software são percebidos na prática, foram elaboradas questões retiradas do material de marketing dos softwares IQ-FMEA/IQ-RM da APIS (APIS, 2009) e Xfmea da ReliaSoft (RELIASOFT, 2009), descritas nesses materiais como benefícios advindos da utilização dos softwares. Esses dois softwares foram escolhidos por possuírem a funcionalidade de apoiar a condução tanto do FMEA, quanto do DRBFM. A respondente percebe que todos esses benefícios são observados na prática. Veja as respostas na Tabela 11.

Tabela 10 - Ferramentas utilizadas para auxiliar o DFMEA/PFMEA/DRBFM

Ferramenta	Frequência de utilização			
	Nunca	Às vezes	Quase sempre	Sempre
FTA (<i>Fault Tree Analysis</i> – Análise da Árvore de Falhas)				X
Software específico				X
Diagrama de Ishikawa (espinha de peixe)			X	
Diagrama de blocos (DFMEA/DRBFM)			X	
Diagrama de fluxo do processo (PFMEA)				X
Gráfico de Pareto				X
Checklists de possíveis falhas	X			
8D (<i>Eight Disciplines</i>)				X
DFMA (<i>Design for Manufacture and Assembly</i> – Projeto para Manufatura e Montagem)			X	

O FTA é uma ferramenta para se identificar e representar graficamente causas múltiplas que podem levar o produto a um determinado estado (na maioria das vezes um estado de falha) (VESELY et al., 1981). O Diagrama de Ishikawa também é uma ferramenta de ilustração de relações de causa-efeito (ARVANITOYANNIS e VARZAKAS, 2007). O 8D (oito disciplinas) é um

procedimento estruturado de análise e solução de problemas que enfatiza o trabalho em equipe.

Os digramas de bloco e de fluxo de processo são especialmente úteis para se conhecer respectivamente a função do item em análise no DFMEA e os requisitos da operação em análise do PFMEA (AIAG, 2008).

O gráfico de Pareto é uma ferramenta gráfica de apresentação de dados, ordenados por tamanho, importância ou prioridades. Determina um critério de prioridades e necessidades, reconhecendo os aspectos principais para facilitar a tomada de decisões, de maneira comparativa. No FMEA essa ferramenta é utilizada para ranquear falhas por valor de índice de risco (ARVANITTOYANNIS e VARZAKAS, 2007).

O DFMA é uma técnica de apoio utilizada para se encontrar falhas potenciais, já que seu objetivo é aperfeiçoar a fabricação de componentes ou simplificar a montagem de produtos (BRALLA, 1996).

Tabela 11 - Itens de avaliação da aplicação do software de apoio – DFMEA/PFMEA/DRBFM

Nº	Item de avaliação	Resposta	
		Sim	Não
1	O uso do software facilita a integração dos membros do time (trabalho em equipe) e facilita que todos os membros colaborem com a análise.	X	
2	O uso do software garante a padronização da terminologia utilizada para nomear funções, modos de falha, efeitos de falha, causas de falha, controles, etc.	X	
3	A utilização do software otimiza o tempo do time.		X
4	O uso do software facilita o gerenciamento de dados de entrada e saída das análises.	X	
5	O recurso de visualização das informações da análise em múltiplas vistas (tabela, árvore hierárquica, etc.) é um recurso útil.	X	
6	O uso do software facilita o gerenciamento das ações de melhoria recomendadas (rastrear/acompanhar o progresso de implementação e garantir que as melhorias são implementadas).	X	
7	O uso do software facilita encontrar e reusar informações importantes (dados ou frases) de DFMEAs/PFMEAs existentes, diminuindo os esforços no desenvolvimento de novas análises.	X	
8	O software facilita a confecção de relatórios com os dados do DFMEA/PFMEA/DRBFM para apoiar a tomada de decisões.	X	

Levantou-se que o FTA é usado para auxiliar a descoberta de causas raiz de falhas efeitos finais, fornecer uma maior compreensão do funcionamento do sistema e identificar causas múltiplas que poderiam levar a uma falha. As respostas para as

demais questões sobre a análise da aplicação do FTA estão mostradas na Tabela 12.

Tabela 12 - Itens de avaliação da aplicação do FTA

Nº	Item de avaliação	Resposta	
		Sim	Não
1	O FTA serve como uma análise preliminar para a elaboração do DFMEA/PFMEA/DRBFM.	X	
2	O FTA é feito durante as sessões de DFMEA/PFMEA/DRBFM quando necessário.	X	
3	A árvore de falhas, ao estabelecer de maneira lógica o encadeamento das falhas de um sistema, facilita a elaboração do DFMEA/PFMEA/DRBFM.	X	
4	Visualizando a árvore de falhas, é mais fácil determinar o efeito e a causa raiz de uma falha.	X	
5	A construção de uma árvore de falhas é realizada por um time multifuncional.	X	
6	A árvore de falhas ajuda na determinação de ações de melhoria.	X	
7	O FTA ajuda na compilação de informações para planejamento de testes.	X	

O Instrumento 2, que avalia a qualidade do *processo* de aplicação sob a perspectiva da **capabilidade**, foi respondido por oito membros de times desses métodos (um do time de PFMEA, um dos times de DFMEA e PFMEA, três dos times de DFMEA e DRBFM, e três dos times de DFMEA, PFMEA e DRBFM). Sete respondentes já tinham participado mais de seis vezes de sessões de análise de falhas potenciais na empresa. Os respondentes foram: quatro Engenheiros de Desenvolvimento de Produtos, um Engenheiro da Qualidade, um Chefe do Planejamento Técnico e Produção, um Planejador da Qualidade do Produto, e um Chefe de Engenharia.

Na Tabela 13 são mostrados os valores das médias, desvios-padrão e índices de concordância calculados com as avaliações dos oito respondentes.

A maioria das práticas (itens de avaliação) teve média superior a sete na escala de 10 pontos (5,5 é o ponto médio da escala) e índice de concordância maior que 0,72, indicando que os membros dos times percebem a presença dos atributos da qualidade do processo requeridos pelo segundo nível de capacidade do CMMI-DEV.

A exceção é o item nove, com média $\mu_9 = 5,5$ e com o menor índice de concordância $C_9 = 0,45$. Essa situação aponta que alguns membros dos times percebem que os métodos não são aplicados em um momento apropriado no ciclo de desenvolvimento de produtos e outros membros acreditam que o momento está

adequado. Um respondente pontuou 9, dois pontuaram 7 e um pontuou 6, enquanto que quatro respondentes atribuíram nota inferior ao ponto médio da escala (5, 4, 3 e 3). Devido a essa discordância entre os respondentes, poderia ser útil para o gerente investigar as implicações práticas que talvez tenham levado metade dos respondentes a avaliarem desfavoravelmente essa prática.

Tabela 13 - Resultados da avaliação da qualidade do processo de aplicação dos métodos sob a perspectiva da capabilidade (escala 1a 10)

Nº	Item de avaliação	μ_i	S_i	C_i
1	Recursos suficientes são alocados para a execução do processo (materiais, apoio de um facilitador, apoio de um patrocinador, etc.).	7,5	1,51	0,72
2	É claro quem é responsável em fazer o que no processo (planejamento, trabalho prévio, o processo em si, etc.).	8,5	1,41	0,76
3	As pessoas participantes têm conhecimento suficiente sobre a aplicação deste processo.	8,13	0,64	0,95
4	As pessoas certas são envolvidas (mix de habilidades <i>cross</i> -funcional, conhecimento sobre a aplicação, etc.) e possuem autoridade sancionada pela gerência.	8,75	1,16	0,84
5	Tempo despendido na execução do processo é suficiente (isto é, nem muito nem pouco tempo).	7,25	1,49	0,73
6	O nível de análise das falhas é adequado e todas alternativas são esgotadas.	7,63	1,6	0,69
7	Documentos e informações de entrada têm qualidade suficiente (completo, acurado, etc.).	7,25	1,98	0,52
8	Documentos e informações de entrada são usados de maneira efetiva no processo.	7,5	1,51	0,72
9	A aplicação dos métodos acontece no momento certo (as alterações no produto/processo podem ser facilmente implementadas e não comprometem o orçamento do projeto (<i>project</i>)), isto é, existe tempo para reagir e garantir o sucesso do projeto (<i>project</i>).	5,5	2,14	0,45
10	Está claro como esses métodos devem ser aplicados (política clara, regras/critérios de decisão, o que cada pessoa tem que fazer, etc.).	7,88	0,99	0,88
11	O processo é bem definido e documentado, com sub-passos claros, saídas dos sub-passos, formulários/ <i>templates</i> padrão, etc.	8,5	0,76	0,93
12	O controle de versão dos documentos/formulários do processo é realizado de maneira efetiva por meio de gestão da configuração.	7,38	1,41	0,76
13	O processo para uso desses métodos é monitorado e controlado (dimensões de desempenho, tais como, qualidade, completude, eficiência, etc., são medidas e gerenciadas).	7	2	0,52
14	O time segue o processo de aplicação dos métodos prescrito pela empresa.	8,75	1,39	0,77
15	Os membros do time mostram respeito um pelo outro durante as sessões.	8,63	1,06	0,86
16	É dado a cada membro do time tempo suficiente para eles colocarem seus pontos de vista.	9	0,93	0,9

Dos dezesseis itens de avaliação sete tiveram média acima de 8. Esses itens mostram as práticas e áreas mais fortalecidas. São elas: dar tempo suficiente para os membros dos times colocarem seus pontos de vista, ter um processo bem definido e documentado, ter os procedimentos de aplicação dos métodos seguidos, terem as responsabilidades sobre as tarefas do processo de aplicação claras, dar treinamento aos membros dos times sobre a aplicação dos métodos, envolver as pessoas (*stakeholders*) certas na aplicação dos métodos, assegurar que os membros do time mostrem respeito mútuo.

Em resumo, os respondentes percebem que o *processo* de aplicação dos métodos FMEA e DRBFM na unidade de negócio está de acordo com o que as normas e manuais prescrevem e satisfaz as práticas requeridas pelo segundo nível de capacidade do CMMI.

6.2. Avaliação da qualidade dos Resultados da aplicação dos métodos FMEA e DRBFM

Para avaliar a qualidade dos resultados da aplicação dos métodos FMEA e DRBFM foi utilizado o Instrumento 3. O Engenheiro de Métodos e Processos da unidade de negócio avaliada foi o colaborador indicado para ser entrevistado.

Para as questões sim/não do instrumento o Engenheiro respondeu sim para todas elas. Portanto, na percepção dele a unidade de negócio aplica essas práticas. As respostas das sentenças avaliadas na escala binária (sim/não) são mostradas na Tabela 14.

Para as sentenças que deveriam ser avaliadas na escala de 10 pontos, foram calculadas as médias (μ_m) dos valores atribuídos a cada método. Os valores dessas médias são listados abaixo:

- $\mu_{DFMEA} = 6,92$ (12 itens de avaliação);
- $\mu_{PFMEA} = 7,18$ (11 itens de avaliação);
- $\mu_{DRBFM} = 10$ (5 itens de avaliação).

Eles indicam que o respondente percebe que a qualidade dos *resultados* do DFMEA e do PFMEA é boa, mas existem oportunidades para melhoria. A média do DRBFM evidencia que sua aplicação é mais detalhada e poderosa. Na Tabela 15 são mostradas as respostas para as sentenças avaliadas na escala de 10 pontos.

Tabela 14 - Respostas do instrumento de avaliação da qualidade dos resultados da aplicação dos métodos FMEA e DRBFM (questões sim/não)

Nº	Item de avaliação	Método	Resposta	
			Sim	Não
1	O DFMEA/PFMEA é bem profundo de maneira que causas/mecanismos de falhas potenciais são identificados para todos os modos de falha.	DFMEA	X	
		PFMEA	X	
2	O DFMEA/PFMEA é completo de maneira que todas as colunas de seu formulário são discutidas e preenchidas.	DFMEA	X	
		PFMEA	X	
3	Toda característica funcional de projeto (<i>design</i>) que engenheiros têm responsabilidade são endereçadas no DFMEA.	DFMEA	X	
4	Todas as verificações de projeto (<i>design</i>) são listadas por causa no DFMEA.	DFMEA	X	
5	Controles de processo são listados por causa no PFMEA.	PFMEA	X	
6	As mudanças de engenharia (intencionais e incidentais) e suas razões são verificadas e descritas em detalhes no DRBFM.	DRBFM	X	

Tabela 15 - Respostas do questionário de avaliação da qualidade dos resultados da aplicação dos métodos FMEA e DRBFM (escala 1 a 10)

Nº	Item de avaliação	Método	Nota
7	Modos de falhas esperados ou típicos são definidos.	DFMEA	8
		PFMEA	8
8	Todos os riscos razoáveis são endereçados/identificados.	DFMEA	7
		PFMEA	7
9	Efeitos de falhas são considerados em relação ao usuário final.	DFMEA	7
		PFMEA	5
10	Índices de severidade, ocorrência e detecção parecem ser consistentes com os modos de falhas.	DFMEA	10
		PFMEA	10
11	O DFMEA/PFMEA é bem profundo de maneira que todos os modos de falhas parecem ser identificados, incluindo modos de falhas relacionados com o uso do cliente e a aplicação do sistema.	DFMEA	7
		PFMEA	5
12	As ações de melhoria especificadas são sempre implementadas.	DFMEA	5
		PFMEA	8
13	As melhorias implementadas são registradas no DFMEA/PFMEA e os índices (severidade, ocorrência, detecção e RPN) são atualizados.	DFMEA	5
		PFMEA	8
14	Falhas com baixo RPN ainda podem trazer problemas significativos.	DFMEA	9
		PFMEA	6
15	A definição dos índices de risco (severidade, ocorrência e detecção) é tão subjetiva que perde sua validade.	DFMEA	7
		PFMEA	7

Continua...

Continuação...

Nº	Item de avaliação	Método	Nota
16	Problemas de projeto (<i>design</i>) que possam causar problemas de manufatura/montagem são identificados no DFMEA.	DFMEA	8
17	O DFMEA inclui causas de falhas relacionadas com integração e interface de sistemas, subsistemas ou componentes.	DFMEA	7
18	O PFMEA está relacionado ao controle de processo.	PFMEA	9
19	O DRBFM ajuda a focar nas modificações intencionais e incidentais, para descobrir todos os problemas escondidos e, portanto prevenir qualquer omissão.	DRBFM	10
20	O DRBFM incentiva a criatividade na busca por falhas potenciais e a descoberta de boas ideias para resolver problemas.	DRBFM	10
21	A linguagem utilizada é clara e específica, isto é, não são usadas expressões/frases vagas e imprecisas. Sempre que possível são incluídas informações.	DFMEA	5
		PFMEA	5
		DRBFM	10
22	As informações inseridas nos formulários são bem detalhadas.	DFMEA	7
		PFMEA	7
		DRBFM	10
23	Para todo modo de falha são determinadas as causas raiz.	DFMEA	7
		PFMEA	7
		DRBFM	10

O respondente atribuiu nota 5 para os itens 12, 13 e 21 do DFMEA. O item 16 aponta que nem sempre as ações de melhoria definidas são implementadas. Assim, sugere-se que o gerente acompanhe (*follow up*) o status das ações especificadas, cobrando os respectivos responsáveis por suas implementações. Contudo, essa disfunção pode ser o efeito de se aplicar o DFMEA tarde no ciclo de desenvolvimento do produto (item 9 do Instrumento 2), não sendo possível, então, implementar as ações. Outra possível oportunidade para melhoria é registrar os resultados das ações implementadas e atualizar os índices de risco (item 13). Se as ações não foram implementadas, devem-se descrever os motivos. Por fim, o respondente percebe que a linguagem empregada é moderadamente imprecisa (item 21). Possivelmente essa disfunção pode ser resolvida se for inserido no treinamento do moderador a instrução de se usar uma linguagem clara e informações quantificáveis sempre que possível. Esse problema também é percebido no PFMEA.

As outras duas oportunidades de melhoria notadas para o PFMEA estão relacionadas à identificação dos efeitos dos modos de falha em relação ao cliente

final (item 9) e à profundidade na identificação dos modos de falha (item 11). A recomendação para os dois casos é que além de se investigar a existência de modos de falha e efeitos de clientes internos (operações subsequentes, revendedor, veículo de transporte, etc.), também se busque modos de falha e efeitos sob o ponto de vista do usuário final.

Finalmente, as pontuações dadas aos itens de avaliação 14 e 15 não foram incluídas no cálculo das médias pois um valor alto para essas sentenças não indica um resultados positivo, no entanto elas chamam a atenção para duas questões. O Engenheiro de Métodos e Processos percebe que falhas com baixo RPN podem trazer problemas significativos, assim o time de PFMEA também deve se atentar a essas falhas para a definição de ações de melhoria. O segundo ponto está relacionado à subjetividade dos índices de risco. O respondente atribuiu nota 7 na escala de 1 a 10 (1 = “Discordo plenamente,” e 10 = “Concordo plenamente”) para a sentença “A definição dos índices de risco (severidade, ocorrência e detecção) é tão subjetiva que perde sua validade”. Essa avaliação sugere que a gerência deve discutir a questão da subjetividade dos índices com os responsáveis pela aplicação do DFMEA e do PFMEA, para melhorar a precisão e conseqüentemente a validade dos índices.

Estes foram os resultados e a análise das informações coletadas pelos três instrumentos de coleta de dados que formam a avaliação da aplicação dos métodos FMEA e DRBFM no Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) da unidade de negócio. A qualidade dos *resultados* da aplicação dos métodos foi bem avaliada. A razão desse bom resultado talvez seja o efeito do *processo* de aplicação dos métodos FMEA e DRBFM na unidade de negócio estar em **conformidade** com as práticas descritas na literatura e ter boa **capabilidade**. As conclusões do estudo são discutidas com detalhes no próximo capítulo.

7. CONCLUSÕES

Neste capítulo são discutidas as conclusões do trabalho (item 7.1) e são apresentadas sugestões para trabalhos futuros (item 7.2). Nas conclusões são comparadas as questões de pesquisa e os objetivos estabelecidos frente aos resultados obtidos, destacando-se também as contribuições do trabalho. Nas sugestões para trabalhos futuros descrevem-se possíveis pesquisas que poderiam ser realizadas tanto a partir dos resultados obtidos quanto para complementá-los.

7.1. Resultados do trabalho

A partir de uma revisão bibliográfica inicial, foram formuladas duas questões de pesquisa e um o objetivo principal. Este último foi desdobrado em dois objetivos específicos. Então procurando atingir os objetivos específicos, obtiveram-se dois resultados principais, a saber: (1) agrupamento dos problemas e das práticas de análise de falhas potenciais presentes na literatura em classes; e (2) práticas que são empregadas por uma empresa que é referência na aplicação dos métodos DFMEA, PFMEA e DRBFM.

Com esses resultados, considera-se que é possível responder as perguntas de pesquisa e que os objetivos estabelecidos são atingidos. A relação entre as perguntas de pesquisa, os objetivos específicos do trabalho e os resultados obtidos é apresentada na Tabela 16. Cada um dos dois resultados descritos na Tabela 16 é discutido em seguida.

Tabela 16 - Relação entre as perguntas de pesquisa, os objetivos específicos e os resultados do trabalho

Perguntas de pesquisa	Objetivos específicos	Resultados
Quais problemas e práticas da análise de falhas potenciais podem ser identificados na literatura?	Identificar, analisar, sumarizar e classificar problemas e práticas da aplicação da análise de falhas potenciais descritas na literatura.	Lista de problemas do FMEA classificados (item 5.2) e de práticas de análise de falhas potenciais (item 5.3).
Quais práticas são empregadas por uma empresa que é referência em análise de falhas potenciais?	Identificar, analisar, e sumarizar, práticas empregadas, por uma empresa referência, para se alcançar uma aplicação efetiva.	Práticas empregadas por uma empresa referência na aplicação dos métodos DFMEA, PFMEA e DRBFM (capítulo 6).

A lista de problemas da análise de falhas potenciais contém 37 problemas, agrupados nas classes: Definição do risco, Recursos, Integração PDP, Temporal, Cultura organizacional, Gestão de informações, Procedimentos, e Comportamental.

Corroborando com Johnson e Khan (2003), a maioria desses problemas parecem ser efeitos de se não se construir e usar o FMEA corretamente, ou seja, eles refletem a falta de conhecimento técnico ou entendimento fundamental prático do executante em relação ao FMEA.

Já a lista de práticas contém 161 práticas classificadas em duas Abordagens, uma Ferramenta, sete Frameworks, sessenta e sete Métodos, vinte e quatro Softwares e cinquenta e duas Diretrizes. Essas práticas estão sendo desenvolvidas em diferentes tipos de indústrias. Ademais, parece que o campo de conhecimento é dominado por estudos exploratórios e investigações de único caso, devido à quantidade de práticas em cada classe e diversidade de locais que os trabalhos foram publicados.

O estudo realizado (revisão bibliográfica sistemática) para gerar a lista de problemas e a lista de práticas não teve a pretensão de esgotar todos os problemas e práticas, mas acredita-se que ele seja abrangente o suficiente para generalizar as conclusões. Sua maior limitação é que seus resultados foram dependentes das publicações que atenderam a critérios específicos de seis bases de dados eletrônicas.

O segundo resultado do trabalho é o conhecimento de práticas empregadas por uma empresa referência na aplicação dos métodos DFMEA, PFMEA e DRBFM. Essas práticas foram levantadas por meio de um estudo de caso realizado em uma unidade de negócio de uma unidade fabril de uma empresa multinacional do setor automotivo.

No estudo de caso foram avaliadas a qualidade do *processo* e a qualidade dos *resultados* da aplicação dos métodos FMEA e DRBFM no processo de desenvolvimento de produtos da unidade de negócio *caso*. A avaliação da qualidade do *processo* foi realizada sob a perspectiva da **conformidade** com práticas descritas na literatura e da **capabilidade** (capacidade ou habilidade de atingir objetivos e metas estabelecidas) de se atingir o segundo nível do CMMI-DEV. Assim, a avaliação verificou se o *processo* de aplicação dos métodos FMEA e DRBFM é planejado e executado de acordo com a política definida para isso, são empregadas pessoas as quais possuem conhecimento suficiente sobre o processo e têm recursos adequados para produzir resultados controlados, são envolvidos *stakeholders* relevantes, e é monitorado e controlado. Já a avaliação da qualidade

dos *resultados* ajudou a determinar se os resultados da aplicação do FMEA e do DRBFM atingem suas metas.

A avaliação indicou uma concordância entre o descrito na literatura e o aplicado na unidade de negócio e apontou tanto áreas e práticas fortalecidas quanto oportunidades para melhoria. Além disso, os resultados da avaliação sugerem que o sucesso da execução dos métodos de análise de falhas potenciais FMEA e DRBFM, na unidade de negócio, é devido à combinação de provisão de recursos, trabalho em equipe multidisciplinar, formação de competências (treinamento), definição de procedimentos, aplicação integrada com outros métodos/ferramentas, e, sobretudo, não considerar a aplicação como uma atividade *pro forma*. Possivelmente, o uso de software de apoio também pode ser incluído nessa lista, já que softwares de apoio à aplicação do FMEA e do DRBFM possuem uma grande variedade de funções que podem otimizar o processo de aplicação (PICKARD, MÜLLER e BERTSCHE, 2004).

As oportunidades para melhoria apontadas foram: momento de aplicação dos métodos no ciclo do processo de desenvolvimento de produtos, consideração de efeitos em relação ao usuário final (PFMEA), profundidade da análise (PFMEA), implementação das ações de melhoria especificadas (DFMEA), documentação dos resultados das melhorias implementadas e atualização dos índices de risco (DFMEA), e utilização de linguagem clara e precisa (DFMEA e PFMEA).

Além do conhecimento sobre uma avaliação da aplicação da análise de falhas potenciais, principalmente sobre o DRBFM, método o qual não tem publicações sobre sua aplicação, este estudo corrobora com outros estudos que enfatizam a importância da aplicação do FMEA, fornecendo indícios de que um FMEA efetivo está ligado ao “sucesso” de uma empresa, já que a empresa caso é benchmark na aplicação do FMEA e líder de mercado.

À parte da restrição de generalizar os achados, o estudo de caso possui sua própria limitação. A principal foi ter questionários como única fonte de coleta de dados. Os colaboradores da unidade de negócio podem ter um viés positivo, não respondendo os questionários de maneira imparcial. Idealmente, uma combinação de técnicas de coleta de dados deveria ser usada. Análise de documentos, entrevistas abertas, e observação são técnicas encorajadas à serem usadas em pesquisas futuras.

Apesar de ser importante reconhecer as limitações do método de pesquisa e das técnicas empregadas, é igualmente importante reconhecer a relevância dos

questionários desenvolvidos e adaptados para a avaliação como resultados adicionais. Os instrumentos de coleta de dados mostraram-se capazes de apontar práticas para melhoria no processo de análise de falhas potenciais. O estudo de caso ajudou a validar esses instrumentos, mas além deles serem uma ferramenta de avaliação, eles podem ser usados como ferramenta prescritiva por uma empresa interessada em melhorar a aplicação da análise de falhas potenciais.

Por fim, o estudo de caso forneceu evidência preliminar que o uso integrado do FMEA com o DRBFM é viável. A unidade de negócio *caso* possui maturidade elevada na aplicação do FMEA, então, talvez, seja indicado aplicar um método para se analisar as falhas devido às mudanças (DRBFM) apenas quando uma empresa alcançar designs livres de falhas (*proven designs*) com a aplicação do FMEA.

A partir dos dois resultados obtidos nesta pesquisa, no próximo item são discutidas sugestões para trabalhos futuros na área.

7.2. Sugestões para trabalhos futuros

A discussão dos trabalhos futuros é realizada separadamente para cada um dos dois resultados principais, discutidos no item anterior.

Iniciando pela lista de problemas do FMEA, parece haver relações de causa-efeito entre os problemas. A Figura 31 mostra exemplos dessas relações. A direção das setas é da causa para o efeito.

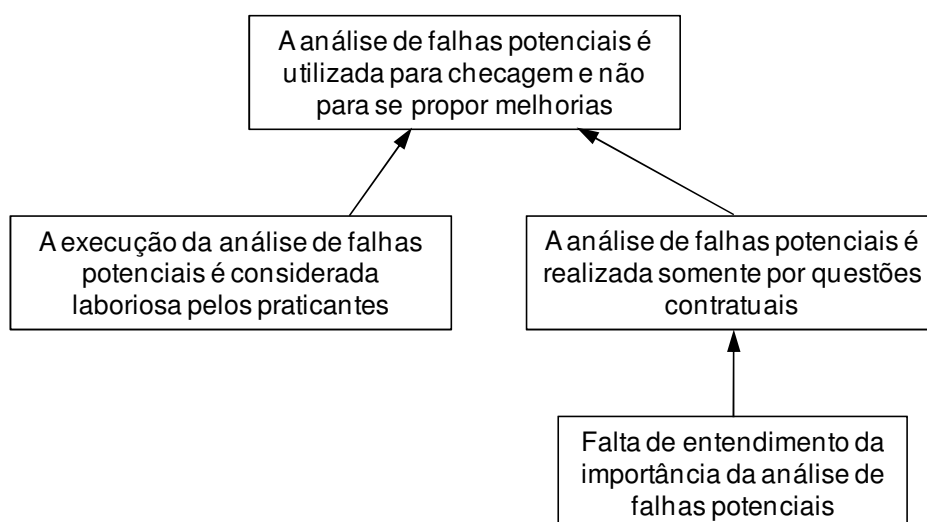


Figura 31 - Exemplos de relações de causa-efeito dentre os problemas da análise de falhas potenciais

Na Figura 31 a direção das setas é da causa para o efeito. Lê-se “A análise de falhas potenciais é utilizada para checagem e não para se propor melhorias”

porque (a) “A execução da análise de falhas potenciais é considerada laboriosa pelos praticantes” e porque (b) “A análise de falhas potenciais é realizada somente por questões contratuais”. Este último, por sua vez, ocorre porque há “Falta de entendimento da importância da análise de falhas potenciais”.

Assim, trabalhos futuros empíricos podem identificar e validar relações entre os problemas e construir uma rede de causa-efeito, que, por sua vez, pode ser usada para orientar o desenvolvimento de práticas voltadas a eliminar as causas raiz.

Concernindo as práticas encontradas, foi constatado que há uma tendência crescente do número de publicações na área, das quais 58,5% advêm de periódicos. Então, já que grande parte foi resultado de investigações de único caso, sugere-se que se desenvolvam trabalhos aplicando-as em outros casos, para que possam ser validadas, confirmadas suas viabilidades e benefícios, e transferidas para diferentes tipos de indústria.

A última sugestão para esse tópico é o desenvolvimento de instrumentos que quantifiquem os benefícios do método FMEA, em termos de custo, melhora na confiabilidade e prevenção de problemas, já que os praticantes têm dificuldades de perceber esses benefícios.

A partir dos resultados obtidos no estudo de caso, considera-se que existem dois focos principais para trabalhos futuros. O primeiro é na própria unidade de negócio *caso*. Já que ela passará por auditoria para certificação nível 2 do CMMI-DEV os questionários de avaliação 2 e 3 podem ser institucionalizados, pois a avaliação de uma dada área de processo usando a representação contínua do CMMI-DEV inclui a qualidade do *output* da área de processo e a própria qualidade do processo. Assim, o instrumento da avaliação da **capabilidade** do *processo* poderia ser respondido em uma frequência determinada (em eventos de ações de melhoria do processo) nas sessões de DRBFM, PFMEA ou DRBFM pelos participantes. E o instrumento para a avaliação da qualidade dos *resultados* poderia ser respondido, em eventos de ações de melhoria, por um colaborador que audita a qualidade dos resultados da aplicação.

O segundo foco refere-se à realização da mesma avaliação em outras empresas, de tamanhos e setores diferentes e iguais, realizando estudo de múltiplos casos. Assim, além de análise intracaso, poderia ser realizada uma análise intercaso, para verificação de relações causais e generalização de conclusões.

APÊNDICE A – PASSOS PARA APLICAÇÃO INTEGRADA DO FTA COM O FMEA

O procedimento descrito neste apêndice foi retirado no livro de Levin e Kalal (2003). Segundo esses autores, o processo de construção de uma FTA começa com a identificação de uma afirmação de falha (evento indesejável). Essa afirmação de falha pode ser extraída do diagrama de bloco funcional (DBF) ou do diagrama de fluxo de processo (DFP), dependendo do item em análise.

Então a afirmação de falha é escrita em um *post-it* e colada na parte superior de um quadro branco ou de uma folha A3. Em seguida, são distribuídos *post-it* e canetas aos membros do time e, por meio de *brainstorming*, eles escrevem possíveis causas que poderiam levar à afirmação de falha.

As possíveis causas levantadas são então discutidas pelo time, e quando todos concordarem, elas são colocadas no quadro branco / folha A3 e ligadas à afirmação de falha por meio de símbolos lógicos E/OU. Se for necessário chegar a um nível mais abaixo, repete-se o processo de *brainstorming* para cada causa identificada.

Então o time discute quais efeitos seriam produzidos pela afirmação de falha (extraída do DBF ou do DFP). Os efeitos são colocados na árvore em um nível superior ao da afirmação de falha. Para cada efeito adicionado, é realizado um novo *brainstorming* objetivando levantar outros eventos que levariam a eles, formando novos ramos na árvore.

O processo de construção da árvore de falha é continuado até que se extraia todos os modos de falha do diagrama, dentro dos limites estabelecidos pelo escopo da análise. No entanto, outros modos de falha podem ocorrer sob certas condições de operação (por exemplo, alta temperatura, baixa temperatura, ambiente seco, ambiente com poeira, etc.). Portanto, os membros do time devem ser estimulados a abstraírem e usarem seus conhecimentos específicos para prever outros modos de falha além dos extraídos do diagrama.

Quando a árvore de falha estiver pronta, o secretário, utilizando o software de apoio à confecção do FMEA/DRBFM, rapidamente transcreve os eventos da árvore de falhas no formulário FMEA. As afirmações de falha são transcritas no campo “Modo de Falha Potencial” do formulário FMEA. O evento topo do FTA, que geralmente é o efeito para o cliente, é transcrito na coluna “Efeitos Potenciais da Falha”, e o último nível da FTA, onde estão as causas mais básicas do evento topo,

é transcrito no campo “Causas Potenciais da Falha”. O formulário do FMEA consolida a FTA de uma maneira que facilita organizar a importância relativa ou riscos das falhas para se propor ações de melhoria.

APÊNDICE B – LISTA DE PUBLICAÇÕES SELECIONADAS NA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

- [1] ALMANNAI, B.; GREENOUGH, R.; KAY, J. A decision support tool based on QFD and FMEA for the selection of manufacturing automation technologies. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 24, n. 4, p.501-507, 2008.
- [2] ARCIDIACONO, G.; CAMPATELLI, G. Reliability Improvement of a Diesel Engine Using the FMETA Approach. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 20, n. 2, p.143-154, 2004.
- [3] ARUNAJADAI, S. et al. Failure mode identification through clustering analysis. **Quality and Reliability Engineering International**, v.20, n.5, p.511-526, 2004.
- [4] ARVANITTOYANNIS, I.; VARZAKAS, T. Application of failure mode and effect analysis (FMEA) and cause and effect analysis for industrial processing of common octopus (*Octopus vulgaris*) - Part II. **International Journal Food Science and Technology**, v.44, n.1, p.79-92, 2009.
- [5] ARVANITTOYANNIS, I. S.; VARZAKAS, T. H. Application of ISO 22000 and failure mode and effect analysis (FMEA) for industrial processing of salmon: A case study. **Critical Reviews In Food Science And Nutrition**, v.48, n.5, p.411-429, 2008.
- [6] ARVANITTOYANNIS, I. S.; VARZAKAS, T. H. Application of failure mode and effect analysis (FMEA), cause and effect analysis and Pareto diagram in conjunction with HACCP to a potato chips manufacturing plant. **International Journal Of Food Science And Technology**, v.42, n.12, p.1424-1442, 2007.
- [7] BELL, D. et al. Using causal reasoning for automated failure modes and effects analysis (FMEA). In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1992. **Proceedings...** Denver, 1992. p.343-353.
- [8] 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.
- [9] BIDOKHTI, N. How to close the gap between hardware and software using FMEA. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2007. **Proceedings...** EUA, 2007. p.167-172.
- [10] BLIVBAND, Z.; GRABOV, P.; NAKAR, O. Expanded FMEA (EFMEA). In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2004. **Proceedings...** Israel, 2004. p.31-36.
- [11] BLUVBAND, Z.; POLAK, R.; GRABOV, P. Bouncing Failure Analysis (BFA): The unified FTA-FMEA methodology. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2005. **Proceedings...** Israel, 2005. p.463-467.
- [12] BOWLES, J. An assessment of RPN prioritization in a failure modes effects and criticality analysis. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2003. **Proceedings...** EUA, 2003. p.380-386.
- [13] BOWLES, John B.; PELAEZ, C. Enrique Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. **Reliability Engineering &**

System Safety, v.50, n.2, p.203-213, 1995.

- [14] BRAGLIA, M.; FROSOLINI, M.; MONTANARI, R. Fuzzy criticality assessment model for failure modes and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.20, n.4, p.503-524, 2003.
- [15] CARMIGNANI, Gionata An integrated structural framework to cost-based FMECA: The priority cost FMECA. **Reliability Engineering & System Safety**, 2008.
- [16] CHANG, C.; LIU, P.; WEI, C. Failure mode and effects analysis using grey theory. **Integrated Manufacturing Systems**, v.12, n.3, p.211-216, 2001.
- [17] CHANG, C.; WEI, C.; LEE, Y. Failure mode and effects analysis using fuzzy method and grey theory. **Kybernetes**, v.28, n.8-9, p.1072-1080, 1999.
- [18] CHAO, L.; ISHII, K. Design process error proofing: Failure modes and effects analysis of the design process. **Journal Mechanical Design, Transactions ASME**, v.129, n.5, p.491-501, 2007.
- [19] CHEN, J. K. Utility priority number evaluation for FMEA. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v. 7, n. 5, p.321-328, 2007.
- [20] CHEN, Liang-Hsuan; KO, Wen-Chang Fuzzy linear programming models for new product design using QFD with FMEA. **Applied Mathematical Modelling**, v.33, n.2, p.633-647, 2009.
- [21] CHEN, T.; CHEN, Y.; CHUNG, Y. Implementation of an enhanced FMEA system for the PCBA design testing a practical case study. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE BUSINESS OF ELECTRONIC PRODUCT RELIABILITY AND LIABILITY, 2004. **Proceedings...** China, 2004. p.72-76.
- [22] CHILDS, J. A.; MOSLEH, A. Modified FMEA tool for use in identifying and addressing common cause failure risks in industry. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1999. **Proceedings...** EUA, 1999. p.19-24.
- [23] CHIN, K.; CHAN, A.; YANG, J. Development of a fuzzy FMEA based product design system. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.36, n.7-8, p.633-649, 2008.
- [24] CHIN, Kwai-Sang et al. Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach. **Computers & Operations Research**, v.36, n.6, p.1768-1779, 2009.
- [25] COLVIN, R.; GRUNSKE, L.; WINTER, K. Timed Behavior Trees for Failure Mode and Effects Analysis of time-critical systems. **Journal of Systems and Software**, v. 81, n. 12, p.2163-2182, 2008.
- [26] DE VISSER, I. M.; VAN DEN BOGAARD, J. A. The risks of applying qualitative reliability prediction methods: A case study. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2006. **Proceedings...** Holanda, 2006. p.532-538.
- [27] DEVADASAN, S. et al. Design of total failure mode and effects analysis programme. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.20, n.5, p.551-568, 2003.

- [28] 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.
- [29] ELMQVIST, J.; NADJM-TEHRANI, S. Tool support for incremental Failure Mode and Effects Analysis of component-based systems. In: PROCEEDINGS - DESIGN, AUTOMATION AND TEST IN EUROPE, 2008. **Proceedings...** Suécia, 2008 p.921-927.
- [30] ESMAEILIAN, G. et al. Particular model for improving failure mode and effect analysis (FMEA) by using of overall equipment efficiency (OEE). In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INFORMATION TECHNOLOGY, 2008. **Proceedings...** Malásia, 2008.
- [31] FARQUHARSON, J. et al. FMEA of marine systems: Moving from perspective to risk-based design and classification. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2002. **Proceedings...** EUA, 2002. p.165-172.
- [32] FERNANDES, J.; REBELATO, M. Proposal of a method to integrate QFD and FMEA. **Gestão & Produção.**, v.13, n.2, p.245--259, 2006.
- [33] FRANCESCHINI, F.; GALETTO, M. A new approach for evaluation of risk priorities of failure modes in FMEA. **International Journal of Production Research**, v. 39, n. 13, p.2991-3002, 2001.
- [34] GANDHI, O. P.; AGRAWAL, V. P. FMEA--A diagraph and matrix approach. **Reliability Engineering & System Safety**, v.35, n.2, p.147-158, 1992.
- [35] GINN, D.; JONES, D.; RAHNEJAT, M. The "QFD/FMEA interface". **European Journal of Innovation Management**, v.1, n.1, p.7-20, 1998.
- [36] GOBLE, W. M.; BROMBACHER, A. C. Using a failure modes, effects and diagnostic analysis (FMEDA) to measure diagnostic coverage in programmable electronic systems. **Reliability Engineering & System Safety**, v.66, n.2, p.145-148, 1999.
- [37] GOEL, A.; GRAVES, R. Using failure mode effect analysis to increase electronic systems reliability. In: INTERNATIONAL SPRING SEMINAR ON ELECTRONICS TECHNOLOGY 2007: EMERGING TECHNOLOGIES FOR ELECTRONICS PACKAGING, 2007. **Proceedings...** EUA, 2007. p.128--133.
- [38] GOFUKU, A.; KOIDE, S.; SHIMADA, N. Fault tree analysis and failure mode effects analysis based on multi-level flow modeling and causality estimation. In: SICE-ICASE INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE, 2006. **Proceedings...** Japão, 2006. p.497-500.
- [39] GRUNSKE, L.; COLVIN, R.; WINTER, K. Probabilistic Model-Checking Support for FMEA. In: FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE QUANTITATIVE EVALUATION OF SYSTEMS, 2007. **Proceedings...** Austrália, 2007. p.119--128.
- [40] GUIMARAES, A. C.; LAPA, C. M. F. Effects analysis fuzzy inference system in nuclear problems using approximate reasoning. **Annals of Nuclear Energy**, v. 31, n. 1, p.107-115, 2004.
- [41] HASSAN, A. et al. Cost-based FMEA and ABC concepts for manufacturing process plan evaluation. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON

CYBERNETICS AND INTELLIGENT SYSTEMS, 2008. **Proceedings...** Síria, 2008.

- [42] HASSAN, A.; GOSEVA-POPSTOJANOVA, K.; AMMAR, H. UML based severity analysis methodology. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2005. **Proceedings...** EUA, 2005. p.158-164.
- [43] HOUTEN, F.J.A.M.; KIMURA, F. The Virtual Maintenance System: A Computer-Based Support Tool for Robust Design, Product Monitoring, Fault Diagnosis and Maintenance Planning. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.49, n.1, p.91-94, 2000.
- [44] HSU, C.; HU, A.; WU, W. Using FMEA and FAHP to risk evaluation of green components. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRONICS AND THE ENVIRONMENT, 2008. **Proceedings...** China, 2008. p.1--6.
- [45] HU, Allen H. et al. Risk evaluation of green components to hazardous substance using FMEA and FAHP. **Expert Systems with Applications**, 2008.
- [46] HUANG, G.; NIE, M.; MAK, K. Web-based failure mode and effect analysis (FMEA). **Computers and Industrial Engineering**, v. 37, n. 1-2, p.177-180, 1999.
- [47] HUANG, G.; SHI, J.; MAK, K. Failure mode and effect analysis (FMEA) over the WWW. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 16, n. 8, p.603-608, 2000.
- [48] JENAB, K.; DHILLON, B. Group-based failure effects analysis. **International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering**, v. 12, n. 4, p.291-307, 2005.
- [49] KARA-ZAITRI, C. et al. An improved FMEA methodology. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1991. **Proceedings...** Reino Unido, 1991. p.248-252.
- [50] KARA-ZAITRI, C.; KELLER, A. Z.; FLEMING, P. V. A smart failure mode and effect analysis package. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1992. **Proceedings...** EUA, 1992. p.414-421.
- [51] KMENTA, S.; ISHII, K. Scenario-based failure modes and effects analysis using expected cost. **Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME**, v. 126, n. 6, p.1027-1035, 2004.
- [52] KRASICH, M. Use of fault tree analysis for evaluation of system-reliability improvements in design phase. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2000. **Proceedings...** EUA, 2000. p.1--7.
- [53] KRAUSE, F.-L.; ULBRICH, A.; WOLL, R. Methods for Quality-Driven Product Development. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.42, n.1, p.151-154, 1993.
- [54] KUKKAL, P.; BOWLES, J. B.; BONNELL, R. D. Database design for failure modes and effects analysis. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1993. **Proceedings...** EUA, 1993. p.231-239.
- [55] LEE, B. Using Bayes belief networks in industrial FMEA modeling and analysis. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2001.

Proceedings... EUA, 2001. p.7-15.

- [56] LEHTELÄ, M. Computer-aided failure mode and effect analysis of electronic circuits. **Microelectronics Reliability**, v.30, n.4, p.761-773, 1990.
- [57] LI, G.; GAO, J.; CHEN, F. Formal Support for Failure Knowledge Modeling and Diagnostic Reasoning Using Polychromatic sets. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL INFORMATICS, 2007 p.645--650.
- [58] LIMNIOS, N.; GUYONNET, J. F. Inductive analysis of failure modes of thermohydraulic systems by numerical simulation. **Reliability Engineering**, v.18, n.2, p.141-154, 1987.
- [59] MONTGOMERY, T. A.; MARKO, K. A. Quantitative FMEA automation. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1997. **Proceedings...** EUA, 1997. p.226-228.
- [60] MONTGOMERY, T. A. et al. FMEA automation for the complete design process. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1996. **Proceedings...** Reino Unido, 1996. p.30-36.
- [61] NEPAL, B. et al. A framework for capturing and analyzing the failures due to system/component interactions. **Quality and Reliability Engineering International**, v.24, n.3, p.265--289, 2008.
- [62] PALUMBO, D. Automating failure modes and effects analysis. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1994. **Proceedings...** EUA, 1994. p.304--309.
- [63] PALUMBO, D. Using failure modes and effects simulation as a means of reliability analysis. In: IEEE/AIAA DIGITAL AVIONICS SYSTEMS CONFERENCE, 1992. **Proceedings...** EUA, 1992. p.102--107.
- [64] PELAEZ, C. E.; BOWLES, J. B. Applying fuzzy cognitive-maps knowledge-representation to failure modes effects analysis. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1995. **Proceedings...** EUA, 1995. p.450-455.
- [65] PEL?EZ, C. Enrique; BOWLES, John B. Using fuzzy cognitive maps as a system model for failure modes and effects analysis. **Information Sciences**, v.88, n.1-4, p.177-199, 1996.
- [66] PICKARD, K.; DIETER, A. Integrative Qualitative Quality Assurance and Reliability Prediction over the Complete Product Design Cycle. **Quality And Reliability Engineering International**, v.24, n.8, p.903--910, 2008.
- [67] PICKARD, K.; MULLER, P.; BERTSCHE, B. Multiple failure mode and effects analysis - An approach to risk assessment of multiple failures with FMEA. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2005. **Proceedings...** Alemanha, 2005. p.457-462.
- [68] PILLAY, A.; WANG, J. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 79, n. 1, p.69-85, 2003.
- [69] PRICE, C. Effortless incremental design FMEA. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1996. **Proceedings...** Reino Unido, 1996. p.43-47.

- [70] PRICE, C.J.; SNOOKE, N.A.; LEWIS, S.D. A layered approach to automated electrical safety analysis in automotive environments. **Computers in Industry**, v.57, n.5, p.451-461, 2006.
- [71] PRICE, C. et al. Combining functional and structural reasoning for safety analysis of electrical designs. **Knowledge Engineering Review**, v. 12, n. 3, p.271-287, 1997.
- [72] PRICE, C.; TAYLOR, N. Automated multiple failure FMEA. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 76, n. 1, p.1-10, 2002.
- [73] PRICE, C.; TAYLOR, N. FMEA for multiple failures. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1998. **Proceedings...** Reino Unido, 1998. p.43--47.
- [74] PRICE, C. J. et al. Flame system: automating electrical failure mode & effects analysis (FMEA). In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1995. **Proceedings...** Reino Unido, 1995. p.90-95.
- [75] 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.
- [76] 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, 2003.
- [77] RUSSOMANNO, D. J. A function-centered framework for reasoning about system failure at multiple levels of abstraction. **Expert Systems**, v.16, n.3, p.148--169, 1999.
- [78] SANKAR, N.; PRABHU, B. 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.
- [79] SEGISMUNDO, A.; MIGUEL, P. 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.
- [80] SEXTON, R. D. An alternative method for preparing FMECA's. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1991. **Proceedings...** Reino Unido, 1991. p.222-225.
- [81] SEYED-HOSSEINI, S.; SAFAEI, N.; ASGHARPOUR, M. 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, n. 8, p.872-881, 2006.
- [82] SHAHIN, A. Integration of FMEA and the Kano model: An exploratory examination. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.21, p.731-746, 2004.
- [83] SHARMA, R.; 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.
- [84] SHARMA, R. K.; KUMAR, D.; KUMAR, P. Fuzzy modeling of system behavior

for risk and reliability analysis. **International Journal of Systems Science**, v. 39, n. 6, p.563-581, 2008.

- [85] SHARMA, Rajiv Kumar; KUMAR, Dinesh; KUMAR, Pradeep. Predicting uncertain behavior of industrial system using FM: A practical case. **Applied Soft Computing**, v.8, n.1, p.96-109, 2008.
- [86] SNEOR, A. Rectifying FMEA - The inter-crossing method. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2003. **Proceedings...** Israel, 2003. p.371-373.
- [87] STONE, R. B.; TUMER, I. Y.; STOCK, M. E. Linking product functionality to historic failures to improve failure analysis in design. **Research in Engineering Design**, v. 16, n. 1-2, p.96-108, 2005.
- [88] TAY, K.; LIM, 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.
- [89] TAY, K. M.; TEH, C. S.; BONG, D. Development of a fuzzy-logic-based occurrence updating model for process FMEA. In: ICCCE08 INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND COMMUNICATION ENGINEERING 2008: GLOBAL LINKS FOR HUMAN DEVELOPMENT, 2008. **Proceedings...** Malásia, 2008. p.796-800.
- [90] TENG, S. et al. Implementing FMEA in a collaborative supply chain environment. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.23, n.2, p.179-196, 2006.
- [91] TEOH, P.; CASE, K. An evaluation of failure modes and effects analysis generation method for conceptual design. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 18, n. 4, p.279-293, 2005.
- [92] TEOH, P.; CASE, K. Failure modes and effects analysis through knowledge modelling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 153-154, n. 1-3, p.253-260, 2004.
- [93] TEOH, P.; CASE, K. Modelling and reasoning for failure modes and effects analysis generation. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 218, n. 3, p.289-300, 2004.
- [94] THROOP, D.; MALIN, J.; FLEMING, L. Automated incremental design FMEA. In: IEEE PROCEEDINGS AEROSPACE CONFERENCE, 2001. **Proceedings...** EUA, 2001. p.7--3458 vol.7.
- [95] TINGDI, Z. et al. Intelligent FMEA based on model FIORN. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2004. **Proceedings...** China, 2004. p.386--390.
- [96] TRAHAN, R.; POLLOCK, A. Using an inverted FMEA to manage change and reduce risk in a FAB. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SEMICONDUCTOR MANUFACTURING CONFERENCE, 1999. **Proceedings...** EUA, 1999. p.15-18,.
- [97] TROUBITSYNA, E. Elicitation and specification of safety requirements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, 2008. **Proceedings...** Finlândia, 2008. p.202--207.

- [98] VINTR, Z.; VINTR, M. FMEA used in assessing warranty costs. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2005. **Proceedings... EUA**, 2005. p.331-336.
- [99] VON AHSEN, A. Cost-oriented failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.25, n.5, p.466-476, 2008.
- [100] WANG, Ying-Ming et al. Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. **Expert Systems with Applications**, v.36, n.2, Part 1, p.1195-1207, 2009.
- [101] WIRTH, R. et al. Knowledge-based support of system analysis for the analysis of failure modes and effects. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 9, n. 3, p.219-229, 1996.
- [102] XU, K. et al. Fuzzy assessment of FMEA for engine systems. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 75, n. 1, p.17-29, 2002.
- [103] 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, 2008.
- [104] YEH, R.; HSIEH, M. Fuzzy assessment of FMEA for a sewage plant. **Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineering**, v.24, n.6, p.505-512, 2007.
- [105] YEN, S.; CHEN, J. L. An eco-innovative tool by integrating FMEA and TRIZ methods. In: ECO DESIGN INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS DESIGN AND INVERSE MANUFACTURING, 2005. **Proceedings... China**, 2005. p.678-683.
- [106] ZAMPINO, E. J.; BUROW, D. The application of RODON to the FMEA of a microgravity facility subsystem. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2002. **Proceedings... EUA**, 2002. p.361-366.

APÊNDICE C – LISTA DAS FONTES QUE TIVERAM APENAS UM ARTIGO SELECIONADO NA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

1. 2006 SICE-ICASE International Joint Conference
2. 30th International Spring Seminar on Electronics Technology 2007
3. 3rd International Conference on Systems, ICONS 2008
4. Advanced Engineering Informatics
5. Aerospace Conference, 2001, IEEE Proceedings
6. Annals of Nuclear Energy
7. Applied Mathematical Modelling
8. Applied Soft Computing Journal
9. Computers & Operations Research
10. Computers and Industrial Engineering
11. Computers in Industry
12. Critical Reviews in Food Science And Nutrition
13. Design, Automation and Test in Europe
14. Digital Avionics Systems Conference, 1992. Proceedings., IEEE/AIAA 11th
15. Engineering Applications of Artificial Intelligence
16. European Journal of Innovation Management
17. International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing
18. Gestão & Produção
19. IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems
20. IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing Conference
21. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2008
22. IEEE Transactions on Reliability
23. 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2007
24. Information Sciences
25. Integrated Manufacturing Systems
26. International Journal of Computer Integrated Manufacturing
27. International Journal of Production Research
28. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering
29. International Journal of Systems Science
30. International Symposium on Information Technology 2008
31. Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineering

32. Journal of Failure Analysis and Prevention
33. Journal of Materials Processing Technology
34. Journal of Systems and Software
35. Knowledge Engineering Review
36. Kybernetes
37. Microelectronics Reliability
38. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers
39. Proceedings of 2004 International Conference on the Business of Electronic Product Reliability and Liability
40. Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering
41. Fourth International Conference on the Quantitative Evaluation of Systems, 2007. QEST 2007
42. Reliability Engineering
43. Research in Engineering Design
44. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing

APÊNDICE D – PROBLEMAS E ARTIGOS QUE ELES FORAM CITADOS

Na Tabela 17 deste apêndice é apresentada a relação de problemas do FMEA e as referências que eles foram citados.

Tabela 17 - Lista dos problemas da análise de falhas potenciais e artigos o os citaram

Problema	Referências
Os valores dos RPNs (<i>Risk Priority Number</i> – Índice de Prioridade de Risco) do FMEA não são precisos.	[8]; [10]; [12]; [14]; [16]; [17]; [18]; [19]; [23]; [27]; [28]; [33]; [15]; [40]; [41]; [48]; [13]; [49]; [51]; [24]; [20]; [61]; [68]; [75]; [76]; [78]; [79]; [81]; [84]; [85]; [83]; [88]; [90]; [99]; [103]; [104]; [106].
A realização de um FMEA completo e rigoroso demanda grande quantidade de tempo e recursos.	[7]; [9]; [11]; [70]; [18]; [21]; [29]; [43]; [31]; [15]; [46]; [48]; [49]; [56]; [59]; [60]; [58]; [61]; [63]; [71]; [69]; [74]; [77]; [80]; [89]; [88]; [92]; [93]; [94]; [95]; [96]; [101]; [105].
A aplicação de métodos de análise de falhas potenciais não é integrada com outros métodos e atividades do PDP.	[45]; [2]; [4]; [5]; [6]; [11]; [21]; [26]; [53]; [31]; [32]; [35]; [38]; [41]; [42]; [44]; [52]; [55]; [20]; [66]; [67]; [75]; [97]; [36]; [101]; [105].
Realizado tarde no PDP.	[3]; [7]; [70]; [18]; [22]; [23]; [42]; [13]; [20]; [60]; [61]; [66]; [72]; [69]; [74]; [77]; [79]; [80]; [87]; [93]; [91]; [94]; [92].
Os índices Severidade, Ocorrência e Detecção do FMEA são utilizados como se todos tivessem a mesma importância.	[8]; [16]; [17]; [33]; [15]; [44]; [48]; [24]; [61]; [68]; [75]; [78]; [81]; [82]; [84]; [85]; [83]; [88]; [99]; [103]; [104]; [106].
Um mesmo valor de RPN pode representar situações caracterizadas por diferentes níveis de risco.	[12]; [16]; [17]; [19]; [33]; [48]; [24]; [68]; [69]; [78]; [79]; [81]; [82]; [84]; [85]; [83]; [88]; [99]; [103]; [104]; [106].
A execução da análise de falhas potenciais é considerada tediosa pelos praticantes.	[65]; [18]; [29]; [49]; [52]; [56]; [60]; [61]; [62]; [71]; [74]; [87]; [89]; [88]; [92]; [93]; [94].
Critérios qualitativos são usados como quantitativos.	[14]; [16]; [17]; [19]; [28]; [33]; [15]; [48]; [13]; [51]; [55]; [20]; [76]; [89]; [102]; [104].
Falta de reuso de informações sobre falhas (FMEAs passados e falhas em campo).	[3]; [7]; [27]; [49]; [54]; [55]; [57]; [61]; [63]; [71]; [87]; [93]; [91]; [99]; [101].
A execução da análise de falhas potenciais é considerada laboriosa pelos membros do time.	[65]; [29]; [39]; [49]; [50]; [56]; [61]; [62]; [63]; [87]; [94]; [101]; [106].
Falhas múltiplas não são consideradas.	[11]; [29]; [49]; [61]; [34]; [67]; [72]; [73]; [81]; [82]; [95]; [99].
Dependente da experiência dos membros do time.	[18]; [23]; [38]; [48]; [71]; [87]; [95]; [96]; [102]; [104]; [105].
Dificuldade em definir ações de melhoria adequadas, considerando a viabilidade (restrições), a chance de sucesso (redução do RPN), e os impactos desfavoráveis (nas pessoas, produto, processo, ambiente).	[2]; [10]; [19]; [30]; [70]; [77]; [79]; [80]; [87]; [96].
Dificuldade em estimar os valores para os índices Severidade, Ocorrência e Detecção do FMEA.	[14]; [39]; [48]; [49]; [24]; [79]; [89]; [90]; [106].
Falta de uma taxonomia padrão.	[3]; [65]; [51]; [55]; [57]; [87]; [93]; [91]; [101].
Os custos das ações de melhoria não são estimados.	[8]; [12]; [14]; [15]; [41]; [51]; [98]; [99].

- Os custos de falhas que chegariam aos clientes não são estimados. [8]; [14]; [28]; [51]; [76]; [98]; [99]; [106].
- Presença de lacunas na escala de 1 a 1000 do RPN do FMEA. [12]; [33]; [15]; [41]; [78]; [81]; [106].
- Dificuldade de se obter dados relevantes sobre o projeto (*design*) do produto/processo. [65]; [18]; [26]; [86]; [87]; [90]; [101].
- O formulário do FMEA não representa todos os dados relevantes da análise. [3]; [31]; [49]; [55]; [57]; [36]; [103].
- Os índices numéricos (Severidade, Ocorrência e Detecção) do FMEA não são expressivos (não expressam a realidade). [19]; [13]; [68]; [78]; [82]; [64].
- Realizada somente por questões contratuais. [[19]; [13]; [68]; [78]; [82]; [64].
- Pequenas mudanças nos valores dos índices (Severidade, Ocorrência e Detecção) do FMEA levam a grandes alterações do RPN. [12]; [14]; [103]; [106].
- Aplicada somente após o protótipo ser construído e testado. [61]; [74]; [92]; [93].
- Utilizada para checagem e não para se propor melhorias. [1]; [18]; [80]; [91].
- Conflito entre os membros do time na atribuição de valores para os índices do FMEA. [14]; [48]; [13]; [106].
- Os níveis de complexidade do item de análise não são considerados. [9]; [65]; [50]; [52].
- Dificuldade de reunir o time multidisciplinar, fornecedores, e consumidores nas sessões de análise de falhas potenciais. [46]; [47]; [90].
- Repetitiva, já que deve estar sempre atualizada. [70]; [31]; [71].
- Não são levados em conta aspectos ambientais na proposição de ações de melhorias. [45]; [44]; [105].
- O RPN do FMEA não considera o tamanho do lote para atribuir a probabilidade de ocorrência da causa da falha. [8]; [16].
- Falta de entendimento da importância da análise de falhas potenciais. [49]; [91].
- O índice de Severidade do FMEA é definido pelo projetista e não pelo consumidor. [82].
- Falta de agrupamento de modos de falhas (mecânica, elétrica, etc.). [37].
- Não existem critérios para selecionar itens (sistemas, subsistemas componentes, operação de fabricação ou montagem) que serão analisados. [36].
- Não considera (previne) falhas originadas em diferentes departamentos da organização. [27].
- Não define modos de falhas de sistemas dependentes de tempo-real, tais como falhas que ocorrem muito cedo ou muito tarde em sistemas de segurança (marca-passos, *airbags*, etc.). [25].
-

APÊNDICE E – DESCRIÇÃO DAS PRÁTICAS ENCONTRADAS NA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

- [1] A ferramenta de tomada de decisão integra os métodos QFD e FMEA, para ser usada durante o processo de automação da manufatura. O QFD é usado para identificar a alternativa mais adequada para a automação da manufatura considerando as dimensões tecnologia, organização e pessoas. Em seguida o FMEA (*failure mode and effects analysis*) é aplicado para identificar os riscos associados com a alternativa escolhida pelo QFD nas fases de projeto (*design*) do sistema da manufatura e de implementação.
- [2] O método FMETA (*Failure mode and effect tree analysis*), que se baseia no *Design Axiomático* integrado aos métodos FMEA e FTA. O objetivo do FMETA é focar a escolha do componente em termos de confiabilidade e escolher a solução que realiza o melhor compromisso entre confiabilidade e restrição, como custos, dimensões, pesos etc. Além disso, o FMETA é capaz de avaliar em detalhes as causas da falta de confiabilidade e apresentar ações de melhorias. O Design Axiomático define a estrutura do produto criando uma árvore decomposta de requisitos funcionais e parâmetros de projeto (*design*). A estrutura da árvore é caracterizada por grande detalhamento dos componentes.
- [3] Método estatístico de clusterização para identificar falhas potenciais, que propõe a construção de uma matriz relacional entre modos de falhas e funções de componentes. Após a elaboração da matriz, é feita uma análise de cluster para agrupar modos de falhas. A matriz é usada como uma base de conhecimento para identificar e analisar falhas em potencial, facilitando a escolha de ações de melhoria.
- [4] Método baseado na aplicação do FMEA para analisar pontos críticos de controle (*Critical Control Points* - CCPs) identificados pela aplicação do método HACCP (*Hazard Analysis and Critical Control Points* - Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle). Uma análise preliminar de perigo é realizada para prever a ocorrência de modos de falhas. É aplicado então o diagrama de Ishikawa (espinha de peixe) e o FMEA no CCPs identificados. Finalmente é criado um diagrama de Pareto para otimizar o FMEA.
- [5 e 6] Método baseado na aplicação do FMEA para analisar pontos críticos de controle (*Critical Control Points* - CCPs) identificados pela aplicação do método

HACCP (*Hazard Analysis and Critical Control Points* - Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle). Uma análise preliminar de perigo é realizada para prever a ocorrência de modos de falhas. É aplicado então o diagrama de Ishikawa (espinha de peixe) e o FMEA no CCPs identificados. Finalmente é criado um diagrama de Pareto para otimizar o FMEA.

- [7] Software para automatizar o FMEA por meio de modelos qualitativos. O processo de racionalização causal (*causal reasoning process*) é aplicado para codificar como um engenheiro usa um diagrama de um sistema, em vez de codificar um conjunto de situações e respostas que o engenheiro previamente encontraria. A vantagem desta abordagem é que não é necessário considerar e solucionar todas as situações que podem ser encontradas num período posterior a análise. O software fornece um diagrama do sistema (modelo causal) e os meios para utilizá-lo para compreender qualquer situação que possa surgir.
- [8] Método FMEA melhorado, com uma nova forma de calcular o RPN, a qual é dado maior peso ao índice Ocorrência. Os autores propuseram o método baseando-se em críticas feitas a outro método de cálculo da expectativa de custo das falhas que chegam ao cliente e das ações corretivas tomadas.
- [9] Método para fechar a lacuna que existe durante o desenvolvimento de hardware e software usando o FMEA. O método apresenta uma sequência de passos que leva em conta desde a formação da equipe, passando pelos inputs do hardware, dos inputs do software, dos inputs dos testes de engenharia e confiabilidade até a implementação das ações corretivas.
- [10] Apresenta o método *Extend FMEA* (EFMEA), que usa um gráfico (*Scree Plot*) para priorizar os riscos associados com as falhas e avaliar a adequação das ações de melhoria. Por meio da análise do gráfico gerado e de uma expressão matemática é definido a ação de melhoria mais adequada para ser implementada, levando em consideração tanto a viabilidade da ação, quanto o seu impacto sobre o risco.
- [11] O método BFA (*Bouncing failure analysis*) estende a análise do FMEA, adicionando a análise de modos de falhas combinados, característica essa do FTA. O BFA substitui a tradicional análise de cima pra baixo do FTA pela análise de baixo pra cima, intuitiva para os engenheiros. O resultado é uma completa análise cobrindo todos os modos de falhas seguido pela testabilidade

e detectabilidade da análise. BFA se inicia com a definição de todos os possíveis efeitos finais para o sistema sob análise, mostra a criação de uma matriz completa de interações para duplos, triplos e múltiplos pontos de falhas. A matriz é criada utilizando tanto FTA e FMEA. Por fim, o BFA apresenta os resultados finais por meio da matriz tradicional do FMEA, levando em consideração a importância dos modos de falhas, de acordo com sua duplicidade, triplicidade e assim por diante.

- [12] Método que modifica o cálculo do RPN do FMEA. No método o autor propõe: (1) retirar o índice detecção, que é o mais subjetivo de todos; (2) segmentar a severidade em classificações nominais como segurança, operacionalidade e estética, relacionado-a com o modo de falha, além de definir um valor máximo para a probabilidade ocorrência em cada classe, sendo que os modos de falha que ultrapassarem os valores pré-estipulados devem ser combatidos; (3) calcular a expectativa de custo para ajudar na avaliação do efeito da mudança no projeto (*design*), multiplicando a probabilidade de ocorrência da falha e o custo do efeito da falha.
- [13] O método é composto de duas maneiras baseadas na Lógica *Fuzzy* para a priorização dos modos de falhas. A primeira, avaliação crítica *Fuzzy*, baseia-se no ranque numérico do RPN tradicional e usa os valores dos índices provenientes da análise de confiabilidade. A segunda realiza uma avaliação crítica usando ranque linguístico *Fuzzy*, e pode ser executada em fases iniciais de projeto (*design*) onde informações são pouco detalhadas pelo fato da prioridade ser calculada por meio de ranques linguísticos.
- [14] Software para a avaliação da criticidade dos modos de falhas baseado na teoria da lógica *Fuzzy*. Propõe o uso de uma função de risco, que permite calcular de forma automatizada as regras da teoria *Fuzzy*.
- [15] Método chamado *Priority-Cost* FMECA (PC-FMECA). Os modos de falhas a serem combatidos são classificados por cálculo modificado do RPN. O cálculo prioriza a severidade e utiliza a ferramenta AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e estima a rentabilidade de cada falha corrigida. A rentabilidade considera as vantagens obtidas com a melhora do projeto (*design*) menos os custos que essas melhorias causariam. A lucratividade financeira de se evitar cada falha é dada pela expressão $P = TLc - TLwm - CoA$, onde: TLc = perda financeira caso a falha venha a ocorrer; $TLwm$ = perda financeira estimada com a ação de

melhoria; CoA = o custo da ação. A abordagem, além disso, propõe uma expressão matemática para selecionar o melhor mix de modos de falhas a serem atacados, levando em conta o orçamento disponível da empresa.

- [16] Aplica a teoria *Grey* para calcular o RPN e ajudar em decisões que as informações são incompletas e o comportamento do sistema é explorado usando análise relacional e modelos de construção.
- [17] O método propõe a aplicação da lógica *Fuzzy* para eliminar conversão dos índices diretamente pela avaliação da linguística e avaliação dos fatores e a teoria *Grey* para obter o RPN atribuindo pesos relativos aos coeficientes sem a utilidade de qualquer função.
- [18] Apresenta o método *Design process* FMEA. O novo método incrementa ao FMEA tradicional um questionário para ajudar na identificação dos modos de falhas e nos seus efeitos. O *Design process* FMEA usa uma nova forma de priorizar os modos de falha, por meio do cálculo do EPN (*Error priority number*). Os erros são advindos das áreas: conhecimento, análise, comunicação, execução, mudança e organização.
- [19] O método apresentado avalia a hierarquia e a interdependência das ações de melhoria aplicando o ISM (*Interpretative structural model*), calcula o peso das ações por meio do ANP (*Analytic network proces*) e, por fim, determina a ordem de prioridade das ações por meio do UPN (*Utility priority number*).
- [20] Propõe a integração do FMEA na primeira e segunda fase do QFD, fases onde são levantados requisitos do produto e desdobrados em características técnicas. A Teoria da Lógica *Fuzzy* é aplicada tanto para o QFD quanto para o FMEA. A integração entre FMEA e QFD, por ser baseado na Teoria da Lógica *Fuzzy*, é feita por expressões matemáticas, tendo como resultado final requisitos de produto condizentes com as necessidades dos clientes.
- [21] Apresenta o software *Enhanced* FMEA (E-FMEA) que trata-se da aplicação dos sistemas CAD/CAM para determinar modos de falhas a partir de medidas e características. A determinação é seguida pela interpretação dos modos de falha baseada na experiência dos projetistas. Aplica-se a regra "*If-Then*" para analisar os efeitos, avaliar o "estrago" (*damage*) e alcançar soluções para solucionar o problema.
- [22] O artigo apresenta causa e fator de ligação taxonômico que são refinados para se ajustarem a metodologia FMEA. Esse refinamento permite o FMEA

considerar os riscos de falha que tem uma única causa e também falhas originadas pela mesma causa (CCFs - *Common Cause Failures*), para a proposição de ações de melhoria.

- [23] Software baseado em conhecimento que usa a lógica *Fuzzy* para eliminar as incertezas dos índices do FMEA. O software auxilia colaboradores inexperientes a realizarem a análise do FMEA na fase de projeto conceitual para melhoria da qualidade e confiabilidade, avaliação de alternativas de design, seleção de materiais, e avaliação do custo.
- [24] Método FMEA que usa a abordagem *Evidential Reasoning* (ER - racionalização por evidência) na análise de decisão de múltiplos atributos. O método proposto captura a diversidade de opiniões dos membros do time e prioriza os modos de falhas sob diferentes tipos de incertezas. O método permite que os fatores de risco sejam agregados em uma medição não linear, ao contrário da multiplicação tradicional no cálculo do RPN.
- [25] O *Timed* FMEA é um método para identificar relações de causa-efeito entre as falhas dos componentes e riscos de segurança em tempo real de sistemas críticos. O método utiliza uma árvore de comportamentos baseado no tempo (*timed Behavior Tree*), que permite ao usuário modelar as restrições de tempo para o comportamento dos componentes.
- [26] Abordagem que consiste em dois caminhos que são realizados em paralelo. No primeiro o FMEA é executado normalmente; no outro, falhas de campo de um produto semelhante ou o mesmo produto são apresentados em um gráfico de Pareto para indicar as causas principais de falhas. Para os mecanismos de falha dominantes uma árvore de análise de falhas (FTA) é realizada, sendo que os resultados finais são as principais causas de falhas do produto dependentes do tempo (falhas por degradação, desgastes, etc.). Os resultados de ambos os caminhos são comparados e combinados para se obter as causas de falhas.
- [27] TFMEA (*Total Failure Mode and Effects Analysis*). O novo método, além da análise tradicional feita no projeto (*design*) e processo de fabricação de um produto feita pelo FMEA tradicional, previne falhas de maneira holística, com a inclusão da análise de falhas originadas em todos os departamentos da empresa.
- [28] FMEA baseado na *Fuzzy Utility Theory*, para definir custos devido a falhas. O método propõe o cálculo dos índices: expectativa de custo de cada modo de

falha, utilidade dos valores, e índice de prioridade de risco (*Risk Priority Index - RPI*). A priorização dos modos de falhas é feita pelo RPI, para a tomada de decisão das ações de melhoria a serem implementadas. É proposto também, por meio da *Fuzzy Theory Utility*, uma forma de otimizar as opiniões dos especialistas durante a aplicação da ferramenta, visto que cada um tem sua opinião sobre os valores dos índices e na maioria das vezes não são iguais.

- [29] Software para automatizar o FMEA de componentes que sofrem mudanças incrementais. O FMEA baseado em componentes trata-se de um método utilizado para gerar interfaces de segurança para os componentes, sendo que para isso encontra-se todas as falhas possíveis do sistema e as interfaces que podem falhar. O software que dá suporte a aplicação desse FMEA, foi desenvolvido na linguagem Java. O software lê as interfaces de segurança dos componentes e gera tabelas automaticamente. Além disso, durante as mudanças o sistema as registra incrementalmente e identifica no FMEA possíveis efeitos, o que permite obter resultados da análise de segurança cedo no ciclo de desenvolvimento.
- [30] Método para reduzir o RPN, melhorando a eficiência global de equipamentos (*overall equipment efficiency - OEE*) por meio de um modelo matemático heurístico baseado em um índice de manutenção do total de produtividade. Nesse método são considerados três fatores: probabilidade de falha, severidade e distinção.
- [31] Neste método o FMEA é aplicado a partir da análise de diagrama de blocos. É elaborada uma matriz de riscos que relaciona os índices de severidade e ocorrência. Nesta matriz são visualizados os riscos não aceitáveis e são definidos os modos de falhas a serem priorizados.
- [32] Método para a integração do QFD ao FMEA, de forma que as saídas do QFD sejam entradas para o FMEA. O objetivo da integração é atingir um nível esperado de qualidade para o produto. O QFD enfoca a satisfação e o desempenho do produto em relação ao cliente, e o FMEA enfoca a análise dos riscos atuais e potenciais de falha de cada função do produto.
- [33] Novo método para priorizar os riscos de modos de falhas. A novidade do método consiste no novo gerenciamento dos dados provenientes do time de projeto (*design*), normalmente obtido por escala qualitativa, sem necessitar de uma conversão numérica artificial e arbitrária, e dessa forma, manter as

informações sempre em uma escala qualitativa. Através da aplicação desse método, mudanças arbitrárias e artificial das escalas são eliminadas, desse modo, os índices são classificados de acordo com sua importância no projeto (*design*) e os modos de falhas são classificados mais adequadamente do que da maneira tradicional. A aplicação é feita por meio de uma equação podendo ser feita por um computador.

- [34] FMEA baseado em digrafos e matrizes. O método leva em consideração a complexidade de interações estruturais e funcionais de componentes de um sistema. Um difrafo de modos e efeitos de falhas, derivado da estrutura do sistema, modela os efeitos dos modos de falhas do sistema. As matrizes são definidas para representar o digrafo e para realizar análise computacional.
- [35] Método para promover interações entre os métodos QFD e FMEA, com o objetivo de enfatizar as características comuns dos dois métodos. No método proposto o QFD e o FMEA são mais do que ferramentas técnicas, em prática, são ferramentas de comunicação, que agem como catalisadores para o trabalho *cross*-funcional.
- [36] O método FMEDA (*Failure Mode Effect and Diagnostic Analysis*), é uma extensão do FMEA que combina o FMEA tradicional com extensões para identificar técnicas de diagnóstico online de quais modos de falhas de componentes são detectados pelo diagnóstico. O FMEDA recomendada gerar taxa de falhas para cada importante categoria (segurança, detectada, segurança, não detectada, perigo, detectado, perigo não detectado) em modelos de segurança. Essas taxas de falhas são usadas para calcular o fator de cobertura da segurança e o fator de perigo.
- [37] Método FMEA aplicado para melhorar a confiabilidade de sistemas eletrônicos. O principal conceito apresentado é o CMF (*Common Mode Failure*). O CMF aparece quando uma única falha causa a falha simultânea de vários componentes de um sistema, fato que ocorre sempre que modos de falhas de dois ou mais componentes são dependentes. Para se evitar que CMF cheguem ao cliente, deve-se usar redundâncias, isto é, componentes que têm a mesma função mas com diferentes princípios de funcionamento.
- [38] Software para gerar automaticamente árvores de falhas (FTA) e tabelas de FMEA a partir de relações causais entre funções e sub-metas de um sistema. As relações causais são modeladas em um modelo chamado *Multi-level Flow*

Modeling (MFM). O MFM é uma técnica de modelagem funcional, a qual modela diagramaticamente um sistema sob o ponto de vista da dimensão meios-finalidade.

- [39] Método *probabilistic*FMEA (pFMEA) incorpora modelagem probabilística de falhas e modelo de checagem, para o cálculo da taxa de ocorrência de modos de falhas. Por meio de análise probabilística, permite que a taxa de ocorrência de um perigo seja formalmente calculada. Para utilizar esse modelo probabilístico com o FMEA, um modelo do sistema em análise, incluindo a sua interação com o meio ambiente, deve ser descrito probabilisticamente. Na descrição é empregado a cadeia de Markov e processos de decisões Markov.
- [40] Método que usa o sistema de inferência *fuzzy* (*fuzzy inference system*) no FMEA para estimar o risco a partir de opiniões de especialistas sobre a quantificação de variáveis linguísticas. O sistema é usado para o cálculo do RPN baseado em um *fuzzy model*, chamado de *fuzzy RPN*. O modelo transforma os valores subjetivos em quantitativos de forma lógica.
- [41] Método FMEA com aspectos financeiros de risco e o modelo ABC (*Activated-Based Cost*). O método mostra como pode ser quantificado os riscos de um plano de processo de manufatura. Na quantificação de riscos o método usa conceitos do *cost-based* FMEA e o ABC baseado no custo para estimar os custos de manufatura do produto levando em consideração o risco e o custo do controle de qualidade. O ABC é aplicado para estimar o custo da manufatura do plano de processo. Já o *cost-based* FMEA é utilizado para analisar os modos de falhas potenciais do processo e estimar os impactos financeiros dos modos de falhas.
- [42] Método baseado em UML (*Unified Modified Language*) para análise da severidade de falhas em fases iniciais do processo de desenvolvimento de softwares. O método combina a probabilidade de falha do software com a severidade da falha, para estimar um fator de risco dos elementos arquiteturais do software. Ele integra as técnicas de análises de perigos: FFA (*Functional Failures Analysis*), FMEA e FTA (*Fault Tree Analysis*). O objetivo é avaliar as severidades de falhas se cenários de sistemas e a severidade das falhas de cada elemento (componentes/conectores) da arquitetura. O FFA é utilizado como abordagem *top-down*, baseado nos cenários dos sistemas, para identificar o nível de falhas do sistema. O FMEA é utilizado como abordagem

botton-up baseado na visão detalhada do sistema, para identificar as possíveis causas das falhas dos componentes/conectores. Finalmente, o FTA correlaciona os resultados do FFA e do FMEA.

- [43] Software de manutenção virtual utilizado para apoiar o FMEA. O software compara o comportamento real e pretendido dos produtos, e possibilita relacionar o comportamento de um produto a sinais específicos, os quais podem ser detectados por sensores e usados para evitar falhas catastróficas.
- [44 e 45] Baseado no HSM (*Hazardous Substance Management*) praticado para componentes verdes, os métodos FMEA e FAHP (*Fuzzy Analytic Hierarchy Process*) são aplicados na análise de riscos de componentes para atender as diretivas da norma europeia RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*). O FMEA é integrado com o FAHP (*Fuzzy analytic hierarchy process*), usado para determinar os índices: ocorrência, detecção, severidade e frequência de componentes verdes usados no produto. Então, para cada componente, é calculado o GC-RPN (*green componente risk priority number*), para identificar e gerenciar os riscos que podem ser derivados dos componentes. O GC-RPN ranqueia os componentes "não verdes" que devem passar por ações de melhorias.
- [46 e 47] O software *Web-based FMEA* inclui três componentes principais: o servidor da web para o FMEA, o servidor para o banco de dados do FMEA e o cliente FMEA. Todos são unidos pela internet ou intranet, e podem estar localizados em locais geográficos diferentes durante a aplicação do FMEA. O usuário usa o navegador da web cliente para conectar ao servidor da web FMEA. Uma vez conectado, o usuário segue as instruções do software e entra com as informações necessárias sobre as páginas da *web*. Os dados introduzidos são analisados localmente pelas máquinas do cliente ou enviados de volta para o servidor para processamento relevante. Tanto os dados digitados como os dados derivados são armazenados no banco de dados FMEA. Cópias físicas dos documentos podem ser impressas sempre que o cliente o solicitar.
- [48] O método *Group-Based Failure Effects Analysis* (GFEA) usa o *Risk Priority Category* (RPC), baseado na lógica *Fuzzy*, e técnicas de tomada de decisão de grupo para estudar os efeitos das falhas sobre as funções/subsistemas e a categoria do risco da falha com informações incertas. Além disso, o método usa operadores compensados que permite balancear os fatores das falhas ou

os atributos das funções/subsistemas. Com isso é possível agregar decisões intuitivas e divergentes de especialistas sobre a importância de fatores de falhas e efeitos de falhas sobre os fatores.

- [49] Método FMEA baseado na teoria da probabilidade desenvolvida para calcular o RPN para todos modos de falha, componentes e sistema. Desta forma, todos os índices calculados podem ser sistematicamente comparados numa base racional, uma vez que são expressos em termos de uma escala probabilística comum. O método apresentado também apresenta o *Ordered Matrix* FMEA, onde todas as informações qualitativas e quantitativas sobre são gravadas de forma gráfica e conveniente, sobre os relacionamentos dos modos de falhas, causas e efeitos. O método foi incorporado a um sistema computacional para identificar eficientemente todas as causas potenciais de falhas.
- [50] Método que combina dos benefícios do *matrix* FMEA e a abordagem probabilística para o cálculo do RPN. O *matrix* FMEA proporciona análise organizada dos modos de falhas de todos os níveis do sistema e dos efeitos das falhas de todo o sistema. A abordagem probabilística é usada para calcular os Índices de Prioridade Local e Global, os quais refletem a importância de um evento (causa, severidade e efeito) em relação aos níveis de consideração e ao sistema inteiro.
- [51] O objetivo do método *scenario-based* FMEA é delinear e avaliar mais precisamente o risco de eventos. Probabilidade e custo fornecem base consistente para análise de risco e tomada de decisão, e cenários de falhas fornecem continuidade através de níveis e fases do ciclo de vida do produto. O método usa a custos esperados de falhas para tomar decisões sobre investimentos em confiabilidade e servibilidade (*serviceability*). Os cenários de falhas são cenários indesejáveis de uma cadeia de causa-efeito, sendo que cada cenário potencialmente resulta em consequências negativas com alguma probabilidade. A cadeia de causa-efeito pode ser aumentada quando são identificados novos efeitos e novas causas. A expectativa de custo é calculada por um modelo matemático que leva em consideração a probabilidade do cenário e uma medida de consequência.
- [52] Método organizado para modos de falhas usando o FTA. O método modela um sistema em relação ao seu modo de falha em potencial associado com hardware, software ou suas interações. É possível avaliar de maneira profunda

cada causa de um modo de falha de componentes de softwares e hardwares, suas funções, estresses, operacionabilidade e interações.

- [53] Método para a integração do QFD e com o FMEA, e para prover *feedback* de informações para os softwares de desenvolvimento de produto auxiliado por computador. O QFD é responsável pelos requisitos técnicos e os desejos dos clientes; o FMEA é responsável por evitar ou reduzir os riscos durante o projeto; e o *feedback* é responsável por capturar as informações sobre todo o ciclo de vida do produto e suas avaliações e uso para as correções e verificações sobre todo nível preliminar do processo de manufatura, de forma a objetivar a otimização do projeto (*design*) e os resultados do planejamento.
- [54] Projeto de uma base de dados relacional para armazenar as informações necessárias e provenientes da aplicação do FMEA. O objetivo de se usar uma base de dados é que com o passar do tempo haverá um montante de informações relevantes armazenado, para ser reusado e apoiar aplicações futuras do FMEA. O projeto da base de dados foi feito usando o modelo Entidade-Relacionamento. Ela consiste em um modelo estático ou estruturado e em um modelo dinâmico ou comportamental. O modelo estático captura dados como sistema de módulos, modos de falhas e efeitos das falhas, relacionamento entre elas, e atributos associados a elas. O modelo dinâmico captura aqueles aspectos do sistema de base de dados que lidam com a forma como os dados estáticos são acessados e manipulados ao longo do tempo.
- [55] O método *Bayes Networking* FMEA (BN-FMEA) emprega a teoria *Bayesian Belief Network* para construir modelos probabilísticos de grafos acíclicos direcionados (*Directed Acyclic Graph* - DAG), que representam dependências causais e estatísticas entre estados de sistemas interno e externo (consumidores e o mundo) e variáveis de eventos de sistemas físicos. BN-FMEA fornece uma linguagem para o time de projeto articular com maior precisão e consistência e menos ambiguidade, as relações de causas e efeitos de falhas de sistemas físicos, bem como a incerteza sobre o seu impacto sobre os clientes e o mundo.
- [56] Software computacional para a aplicação do FMEA em circuitos eletrônicos. O software é baseado em duas partes, a parte do programa FMEA, que consiste dos inputs, outputs, análise do circuito e FMEA, e a parte manual que inclui a avaliação dos resultados apresentados pelo software.

- [57] O objetivo do método apresentado é contribuir para o reuso de conhecimentos presente no FMEA por meio de uma abordagem de modelagem de conhecimento. Na modelagem são empregados teoria *Polychromatic sets* e matrizes Booleanas para construir um modelo de representação de conhecimentos sobre falhas. O modelo é um *framework* que organiza os modos de falhas, as causas e efeitos de maneira completa e sistemática. Os modos de falhas são definidos como propriedades inerentes de componentes em diferentes níveis hierárquicos. Eles são organizados em termos de seus inter-relacionamentos e relacionamentos com o sistema físico, oferecendo vantagens de precisão e completividade na análise de sistemas complexos. Usando o modelo e as matrizes, é possível automatizar, em um processo iterativo de busca, um diagnóstico de racionalização de causas e/ou efeitos de falhas.
- [58] O software simula o comportamento de circuitos termo-hidráulico na presença de falhas em componentes, auxiliando a construção das tabelas do FMEA. O software inclui: uma biblioteca de componentes e seus modos de falhas; um módulo interativo para escolher componentes apropriados a partir da biblioteca e para construir um dígrafo do circuito; um módulo da configuração do circuito em termos de equações, considerando modos de falha para serem simulados; e um módulo para a resolução do sistema de equações e para o controle dos parâmetros funcionais.
- [59] O FMEA *Streamlining* é um software que usa simulação quantitativa de circuitos. Basicamente, o software contém um loop que simula cada falha potencial do circuito em desenvolvimento. O FMEA *Streamlining* usa simulação análoga usando os mesmos modelos desenvolvidos para entender como o circuito opera nominalmente para entender modos de falha.
- [60] Software para automatizar todo o ciclo de desenvolvimento de sistemas de circuitos elétricos/eletrônicos. Para a automação cobrir todo o ciclo de desenvolvimento, é proposto que seja usada simulação qualitativa e quantitativa. A simulação qualitativa é empregada nas fases iniciais do desenvolvimento (projeto da arquitetura), quando o design detalhado não está disponível. Já a quantitativa é aplicada nas fases adiantadas do desenvolvimento, após o projeto do circuito ter sido largamente definido. Combinando os dois tipos de simulação em uma única ferramenta promove apoio em múltiplos

níveis de detalhes, partindo do sistema completo e os efeitos sobre o consumidor, para os componentes individuais e causas raiz.

- [61] O objetivo do framework desenvolvido é capturar e analisar os modos de falha que podem ocorrer devido à interação dos componentes e elementos funcionais de um sistema. O framework baseia-se na definição da arquitetura do produto, seguido pela aplicação de um modelo chamado SFC (*Structure-Functions-Constraints*). O modelo visa identificar, por meio de simulação, as interações entre os componentes e suas restrições e extrair os modos de falhas que poderiam ocorrer devido às interações entre os componentes. Os modos de falhas são inseridos em uma matriz (*functional interactions failure matrix*). São calculados índices de severidade, ocorrência, detecção e o RPN para cada modo de falha identificado utilizando *fuzzy logic*. Além do índice de prioridade de risco (RPN), o framework apresenta o cálculo de outro índice, para os modos de falha, chamado “*criticality index*” para apoiar a tomada de decisão. Com os dois índices é elaborada uma tabela de priorização dos modos de falha para os quais são recomendadas ações de melhoria.
- [62] O software apresentado modela o comportamento de falhas de um sistema por meio da definição modular. A definição do módulo contém uma parte declarada (entradas, saídas e variáveis do módulo) e uma parte comportamental (modelo lógico). O sistema é definido como um diagrama de bloco dos componentes do módulo e suas interconexões. O FMEA é produzido por meio da simulação do processo de propagação das falhas.
- [63] O software *Failure Modes and Effects Simulation* (FMES) é uma maneira efetiva de se realizar o FMEA e análise de confiabilidade. O FMEA cria um conhecimento básico da resposta do software à falha em componentes. Análise de confiabilidade usa o FMEA combinado com taxas de falhas em componentes e taxas de recuperação do software para construir um modelo que pode ser resolvido pela probabilidade do sistema falhar. O FMES descreve o sistema com um grupo de componentes. Um componente é definido com suas interconexões (entradas e saídas), seu estado (o componente e suas saídas podem ocupar diferentes estados) e a descrição de seu comportamento (caracteriza ocorrem mudanças no componente e seus estados). O FMEA é apoiado pela linguagem RML (*Reliability Modeling Language*) para modelar o sistema e automatizar o FMEA.

- [64 e 65] O método apresenta como *Fuzzy Cognitive Maps* (FCM) podem ser usados para descrever um sistema, sua missão, modos de falha, causas e efeitos. Os mapas substituem a utilização de valores numéricos dos índices do FMEA (S, O, D e RPN) por expressões como: sempre, pouco, fraco, forte, etc. Essas expressões contribuem para que os especialistas cheguem mais facilmente ao consenso sobre os índices. Os mapas podem ser avaliados usando métodos numéricos e métodos gráficos para determinar os efeitos de uma falha e a consistência de decisões sobre a priorização de modos de falha para ações de melhoria.
- [66] O método de integração da qualidade assegurada e de predição da confiabilidade auxilia a comparar e selecionar conceitos, de maneira qualitativa, durante todo o ciclo de desenvolvimento do produto. As informações sobre os conceitos vão sendo transferidas ao FMEA. Então baseada nas adaptações e atualizações realizadas no FMEA durante o ciclo de desenvolvimento do produto, é estimado o tempo de vida do produto, por uma distribuição do tempo de vida (por exemplo, distribuição Weibull).
- [67] Pela integração dos procedimentos dos métodos FMEA e FTA em um procedimento combinado, o mFMEA (*multiple Failure Mode and Effects Analysis*), torna-se possível realizar a análise de confiabilidade de sistemas mecâtrônicos complexos. As vantagens dos dois tradicionais métodos são trazidas para o novo método. OFMEA contribui com a análise de riscos, avaliação de riscos e medidas de controle, aplicado apenas para falhas singulares (não múltiplas). O FTA expande o novo método por meio de uma análise de falhas a o auxílio da opção combinada para redes de falhas de acordo com a lógica Booleana. Informações quantitativas relacionadas com a disponibilidade do sistema podem ser derivadas, por meio do uso de redes de falhas. Essas são informações importantes para serem usadas com os resultados do FMEA.
- [68] O método FMEA que usa a lógica probabilística *Approximate Reasoning* (racionalização aproximada). O formalismo *Approximate Reasoning* é baseado na lógica *Fuzzy*, que é combinada com a teoria *Grey* para gerar o RPN do FMEA. O objetivo é desenvolver um método que não necessite do uso de uma função para se definir os índices de severidade, probabilidade de ocorrência e de detecção para a análise e para evitar o uso do RPN tradicional. Isto é

alcançado usando informações advindas de especialistas e integrando-as em uma maneira formal para expressar um método subjetivo de ranquear riscos.

- [69] Modificação do software FLAME que é usado para automatizar a realização do FMEA em projetos elétricos. O software é modificado para a aplicação do FMEA possa ser realizada de maneira incremental, tornando a tarefa dos engenheiros de realização do FMEA menos trabalhosa. O software usa uma descrição da estrutura do projeto elétrico e das funções do subsistema para gerar os efeitos de cada modo de falha no projeto (*design*). Ele também é capaz de determinar valores do RPN para cada efeito de falha, usando valores determinados para falhas similares em modelos similares.
- [70] A pesquisa descreve como a capacidade (*capability*) e utilidade de um software de análise de segurança de projetos elétricos podem ser melhoradas separando em camadas os tipos de conhecimentos usados. A separação do conhecimento em camadas permite que possa ser reusada uma quantidade máxima de informações à medida que o projeto do sistema elétrico evolui é modificado. Além disso, a separação também permite que ferramentas do software monitorem as consequências das mudanças para o projeto, de modo que a repercussão de qualquer mudança na concepção possa ser entendida.
- [71] O software apresentado é chamado FLAME, que evoluiu ao longo dos anos movendo gradualmente de protótipos de pesquisa. O FLAME que combina racionalização funcional e estrutural para a análise da segurança de projetos elétricos. Ele proporciona uma assistência automatizada para os engenheiros em todos os aspectos durante a geração do FMEA para projetos elétricos. As funções especificadas de um projeto de um circuito são combinadas com um modelo qualitativo de um circuito elétrico que atenda às funções, e usadas para analisar a segurança do projeto. Os modelos funcionais são incorporados por componentes de uma extensa biblioteca. As representações incorporadas são submetidas a uma simulação de computador, a fim de ver o efeito de uma lista de possíveis falhas no novo projeto. Existe uma lista de possíveis modos de falha para todos os componentes dentro da biblioteca, os quais são atribuídos com base num histórico de ocorrências de falhas.
- [72] Software para automatizar o trabalho de produzir um relatório de um FMEA, para projetos de circuitos elétricos, que contenha a análise dos efeitos de múltiplas falhas significativas e também falhas singulares. O software utiliza

simulações qualitativas de versões do projeto do circuito. As simulações qualitativas permitem que o FMEA seja executado cedo no ciclo de desenvolvimento, assim que um circuito que represente o sistema possa ser desenhado, com significativa redução do esforço necessário.

- [73] O software AutoSteve é a re-implementação em linguagem C++ do software FLAME para falhas múltiplas. O AutoSteve simula o comportamento de um sistema sob a presença de falhas em componentes, e, comparando com a simulação do sistema sem falhas, indica qual função irá falhar. O software usa simulações para gerar taxas aproximadas de falha de componentes para selecionar as combinações mais prováveis, e tira o que não é necessário do relatório do FMEA em uma extensão que torna prático para um engenheiro estudar e agir em cima dos resultados.
- [74] A aplicação do software FLAME, para automatizar a aplicação do FMEA em circuitos elétricos, é dividida em três partes: (1) construção do modelo que descreve o circuito elétrico o qual o FMEA será aplicado; geração do FMEA, que proporciona avaliação das falhas do sistema pelos índices do FMEA (S, O e D); (3) exame interativo do FMEA, que reporta os resultados do FMEA ao usuário. A automação da realização do FMEA por meio de simulação permite que erros no projeto do sistema elétrico sejam detectados antes da construção de protótipos físicos.
- [75] O método apresenta uma nova perspectiva para o FMEA baseada sobre dois sistemas de apoio a decisões. O primeiro permite classes, ou intervalos de valores, serem determinados não apenas para os índices de detecção, frequência e severidade, mas também para a resultante prioridade de risco de cada causa da falha potencial. O segundo sistema expande o primeiro, aplicando a teoria *Fuzzy* em todas as variáveis consideradas no sistema de decisão, por meio de regras qualitativas as quais fornecem um ranking dos riscos das causas de falhas potenciais do sistema de produção.
- [76] O método *Life Cost-Based FMEA* é um método para comparar e selecionar alternativas de projeto (*design*) capaz de reduzir o custo do ciclo de vida de um sistema particular. A simulação de Monte Carlo é aplicado ao método para considerar incertezas em relação à: tempo de detecção, tempo de reparo, ocorrência, tempo de espera, tempo de parada, e modelos de cenários complexos. *Life Cost-Based FMEA* não apenas auxilia nos melhoramentos do

projeto e seleção de concepções, mas também permite que seja melhorada e planejada a manutenção preventiva e programada de componentes. Além disso, o método permite comparações de diferentes medidas de melhoria disponíveis e traça a análise em termos de custo, uma medida de risco amplamente aceitável.

- [77] O framework organiza o conhecimento para uma simulação de subsistemas que é um componente de um software *expert* para a análise do FMEA. Organizando o conhecimento base da simulação do subsistema ao redor de uma ontologia de função centrada, é produzida uma arquitetura que facilita a racionalização sobre um projeto de engenharia em múltiplos níveis de abstração e por todo o ciclo de vida do projeto. Além do mais, a arquitetura resultante proporciona a capacidade para incorporar a análise assistida por computador e ferramentas de projeto cedo no projeto conceitual de um sistema de engenharia, antes que um comprometimento seja feito, para implementar uma tecnologia específica no comportamento do sistema. O resultado é uma fonte de conhecimento de simulação do software *expert* que pode ser usado para racionalizar os efeitos de falhas do sistema baseado no projeto conceitual.
- [78] O método para priorizar falhas para a proposição de ações de melhoria expande a priorização de risco além do convencional RPN do FMEA. Foi definido uma nova escala de 1 a 1000 chamada *Risk Priority Ranks* (RPRs), usada para representar o aumento do risco de 1000 maneiras possíveis para severidade-ocorrência-detecção. A atribuição de valores para o risco é baseada na regras "*If-Then*".
- [79] Método que usa o FMEA para gerenciar riscos técnicos e otimizar o processo de tomada de decisão no PDP. O método apresentado parte do princípio que existem projetos parciais dentro de um projeto principal, assim o é sugerida uma nova maneira para calcular o RPN do projeto principal. Essa maneira leva em conta o RPN de cada projeto, seus fatores de riscos e a influência da qualidade.
- [80] O método propõe uma alternativa para salvar custos da preparação do FMEA. A aplicação do método é rápida e permite que os engenheiros influenciem nas decisões do projeto usando o estudo do FMEA, à medida que o projeto (*design*) evolui. O método aplica uma abordagem *bottom-up* para relacionar os

modos de falhas dos componentes e as funções afetadas por eles nas montagens do sistema.

- [81] Método de apoio à tomada de decisão sobre ações corretivas baseadas na re-priorização de modos de falhas do FMEA. O método é chamado DEMATEL (*Decision Making Trial and Evaluation Laboratory*). As alternativas são priorizadas baseadas na severidade do efeito ou influência e tipo de relação (direta/indireta) entre elas. Uma influência indireta significa que um modo de falha pode ser uma causa de outro modo de falha. O DEMATEL analisa relações e estruturas entre componentes de um sistema, com respeito aos seus tipos (direto/indireto) e severidade, ou um número de alternativas disponíveis. Desta forma, com o DEMATEL é possível representar os modos de falhas em sistemas com muitos subsistemas e componentes, considerando que em tais sistemas o RPN pode ser uma abordagem pouco eficiente.
- [82] O método aumenta as capacidades do FMEA por meio de sua integração ao modelo de Kano, tornando-o um método orientado ao consumidor (*customer oriented*). A integração envolve a abordagem tradicional para a determinação da severidade e do RPN, classificando as severidades dos modos de falha de acordo com as percepções do consumidor. A integração apóia a relação não linear entre frequência e severidade de falha, característica do modelo de Kano, que caracteriza atributos de um produto ou serviço, baseada em quão bem os atributos são capazes de satisfazer as necessidades do consumidor. Além disso, é proposto um novo índice denominado “*correction ratio*” (Cr) para facilitar a determinação falhas críticas para ações de melhoria, baseado no critério meta de ocorrência.
- [83] O artigo apresenta um método para calcular o RPN usando um modelo linguístico *Fuzzy*. Na abordagem proposta, os índices (S, O e D) são representados como membros de um conjunto *fuzzy* “fuzzificado” (*fuzzified*) usando uma apropriada função membro (*membership function*). A função faz uso de uma base de regras bem definidas e operações lógicas *fuzzy* para determinar o nível do risco das falhas, sendo que o resultado obtido com isso é “desfuzzificado” (*defuzzified*) para se obter o RPN.
- [84] O framework apresentado usa técnicas quantitativas e qualitativas para análise de risco e confiabilidade de um sistema. A técnica quantitativa faz uso de uma síntese fuzzy de dados de falhas e reparos. Vários parâmetros do sistema de

importância gerencial, tais com, tempo de reparo, taxa de falhas, tempo médio entre falhas, disponibilidade, e número esperado de falhas, são computados para quantificar o comportamento em termos de valores *fuzzy*, inteiro (*crisp*) e “desfuzzificado” (*defuzzified*). Para melhorar as características de confiabilidade e manutenibilidade do sistema, é feita uma análise qualitativa usando o FMEA. Endereçando as limitações do FMEA tradicional em relação ao cálculo do RPN, é proposta uma abordagem de ranqueamento de risco que usa teoria *Fuzzy* e análise *Grey relational* para priorizar modos de falhas.

- [85] O framework apresentado faz o uso da metodologia *Fuzzy*, uma abordagem de racionalização aproximada (*approximate reasoning*) para gerenciar informação imprecisa, incerta e subjetiva relacionada com o desempenho do sistema.
- [86] O método *Inter-Crassing* diminui a chance de falha de notar causas de falha. O método usa *checklists* para prevenir que causas elusivas não sejam notadas. O *checklist* é estendido para uma tabela de checagem para escanear todo o sistema para gerar todas as causas de falhas potenciais. A tabela é composta de: uma lista dos componentes do sistema em diferentes estágios do ciclo de vida do produto (matéria prima, manufatura, testagem/inspeção/calibração, transporte e uso); e uma lista de parâmetros, agrupados em famílias (condições de uso, líquidos, radiação, desvio dimensional, reação química, envelhecimento, resíduos, carregamento perigoso, etc.) que podem afetar o sistema.
- [87] O *Function-Failure Design Method* (FFDM) é um método que permite ao projetista realizar o FMEA no projeto conceitual. O método oferece melhoramentos substanciais para o processo de desenvolvimento já que ele melhora a análise de falhas e permitir que seja reduzido o número de *redesigns* (retrabalho), e, conseqüentemente, diminuindo o tempo global do ciclo do desenvolvimento. Isto é alcançado por meio de um banco de dados do histórico de falhas em componente em campo e a taxa de ocorrência dessas falhas para guiar os novos projetos de desenvolvimento. O banco de dados relaciona os conhecimentos nele armazenados em representações funcionais de componentes que falharam, sendo o relacionamento feito de maneira matricial. Para garantir o reuso efetivo das informações armazenadas no banco de dados, são usadas uma representação funcional formal (modelagem funcional

e um grupo padronizado para terminologia relacionada com a função dos componentes) e uma taxonomia para dar nomes a modos de falhas.

- [88] Método para simplificar o FMEA baseado na lógica *Fuzzy*. O método reduz o número de regras que são necessárias serem fornecidas por usuários do FMEA para o processo de modelagem do *Fuzzy* RPN. Para isso é proposto um sistema guiado de redução de regras (*Guided Rules Reduction System - GRRS*). Empregando o GRRS os usuários não precisam fornecer todas as regras, mas apenas as mais importantes quando construírem o modelo *Fuzzy* do RPN.
- [89] O framework proposto é equipado com um modelo de inferência *Fuzzy* para prever o índice de ocorrência. O objetivo do framework é facilitar tanto a definição do valor do índice ocorrência quanto à redefinição do índice após a melhoria para o projeto ser proposta, sem subjetividade.
- [90] O método proposto fornece diretrizes para a indústria de manufatura na correção de problemas de aplicação do FMEA, para que empresas possam adotar seus processos de FMEA em um ambiente colaborativo da cadeia de suprimentos. Além disso, é apresentada uma ferramenta baseada no Microsoft Excel, que proporciona uma maneira simples de auxiliar os engenheiros na tomada de decisão com relação à frequência de testes e requisitos de confiabilidade que o projeto (*design*) irá necessitar.
- [91] O artigo apresenta um método para a geração do FMEA chamado FMAG. O FMAG é baseado na abordagem “fragmento de conhecimento” (*knowledge fragment*). Relatórios de falhas anteriores são fragmentos de conhecimentos que refletem a deliberação, racionalização (*reasoning*) e experiência de especialistas. Cada “fragmento de conhecimento” por si mesmo não contribui muito com o processo de racionalização. No entanto, eles podem ser organizados para fornecer ao processo conhecimento com significado, e altamente reutilizáveis. A vantagem desta abordagem é que a racionalização pode ser conduzida baseada em uma quantidade relativamente pequena de informações. Os modelos necessários para a racionalização são menos complexos comparados com a abordagem baseada em modelos (*model-based*). Os modelos são guiados por informações estabelecidas de ontologias ao invés de princípios básicos, e podem ser facilmente arranjados baseados em simples regras heurísticas de racionalização de conhecimentos não

detalhados. Daí, o FMAG é um método apropriado para racionalização no projeto conceitual.

- [92] O *framework* apresentado tem o objetivo de gerar automaticamente um FMEA, reusando conhecimentos presente em FMEAs anteriores. O framework é composto de um modelo de FMEA e uma técnica de racionalização (*reasoning*). O modelo de FMEA é criado com base no sistema de transformação. Bibliotecas de componentes são criadas e generalizadas usando a abordagem orientada a objetos. A geração automática do FMEA é realizada por meio da técnica de racionalização funcional. São introduzidos conceitos sobre unidade funcional e diagrama funcional. Uma Função Genérica é usada como um objeto abstrato para representar funções de projetos e processos. Propagação de causa e efeito é usada no diagrama funcional com o auxílio de dois relacionamentos, condição e pós-condição.
- [93] Apresenta o método FMAG (*for FMEA generation*) para gerar automaticamente o FMEA por meio de modelagem e processo de racionalização. O modelo é criado utilizando o método IDEF3 (modelagem estrutural e funcional). O processo de racionalização é baseado na abordagem “fragmento de conhecimento” (*knowledge fragment*).
- [94] O software FMEA incremental automatizado usa o simulador EPOCH (*Engineering Product and Operations Cross-cutting Hybrid*) para automatizar a geração do FMEA a partir de modelos de projeto (dados do projeto). A ferramenta desenvolve um grupo de análises baseadas em cenários, usando o simulador híbrido CONFIG, para gerar relatórios que sumarizam os resultados das análises. A automação apóia o FMEA incremental reportando como uma modificação no design (projeto) altera a apresentação dos efeitos funcionais de falhas, vistos em um grupo de cenários operacionais.
- [95] O framework iFMEA (*intelligent FMEA*) é um mecanismo de inferência inteligente baseado no modelo alvo do sistema. O framework é composto por três partes: analisador de modos de falha, analisador de efeitos de falha e criador de relatório de FMEA. Por meio de modelos hierárquicos do sistema e utilizando o modelo FIORN (*Failure, Input/Output Relationship Nets* - Redes de relações de entrada e saída de falhas) são analisados os modos de falhas e seus efeitos e criado o relatório do FMEA.

- [96] O método FMEA invertido guia o agente de mudança para a metodologia apropriada de avaliação e o plano de qualificação. O FMEA invertido se inicia listando-se as mudanças propostas para o sistema existente. Considerando as questões a seguir, o time de FMEA constrói o FMEA invertido: a) o que está sendo modificado?; b) com isto pode afetar a saída do processo?; como a saída do processo pode afetar o produto? Quais dispositivos, circuitos são afetados?; quais checagens podem ser feitas para garantir igualdade? Qual avaliação pode ser introduzida para garantir confiabilidade?
- [97] O artigo apresenta um método que integra FMEA e FTA para especificar requisitos de software. O método incorpora naturalmente requisitos advindos de análise de segurança no processo de desenvolvimento de software. Na análise de segurança são usados gráficos de estado (*statecharts*) para facilitar a construção de um sistema de controle. O *Statechart* é um formalismo visual o qual pode ser visto como generalização do convencional *finite state automata*. Ele forma uma parte da técnica popular de modelagem orientada a objeto *Unified Modeling Language* (UML). O formalismo apóia características como hierarquia, simultaneidade, e comunicação ampla entre componentes de sistema. *Statecharts* descrevem o comportamento do sistema como uma evolução de um estado para outro sob a chegada de um evento. No método proposto, os gráficos de estado servem como base para estruturar e integrar os resultados dos métodos FMEA e FTA. O uso de gráficos de estado como meio de comunicação entre segurança e engenheiros de software assiste o processo de descoberta de requisitos.
- [98] Método que aplica o FMEA na avaliação de custo de garantia de produtos reparáveis. O método proposto é especialmente adequado para novos projetos de produtos quando não estão disponíveis informações confiáveis coletadas pelo monitoramento de produtos em uso e especialmente do período de garantia. São adicionadas as seguintes colunas no formulário do FMEA: tipo de reparo, número de falhas, consumo de mão de obra de reparo, peças sobresselentes e material, outros custos, custo total.
- [99] O método *cost-oriented FMEA* (FMEA orientado aos custos) é usado como ferramenta para tomada de decisão, que integra uma perspectiva de qualidade-custo para determinar ações de melhoria, considerando recursos limitados. Isto

é alcançado por meio do cálculo do novo RPN baseado nos custos das falhas internas e externas à empresa.

- [100] É apresentada avaliação de risco no FMEA usando média geométrica ponderada *fuzzy*. Neste método os índices do FMEA tradicional (severidade, ocorrência, e detecção) são tratados como variáveis *fuzzy* e são avaliados usando termos linguísticos *fuzzy* e escalas *fuzzy*. Como resultado, são propostos *Fuzzy Risk Priority Numbers* (FRPN) para a priorização de modos de falha. Os FRPNs são definidos como médias geométricas ponderadas *fuzzy* dos índices *fuzzy* para severidade, ocorrência e detecção, e podem ser computados usando grupos de nível-alfa e programação linear de modelos. Para o propósito de classificação, os FRPNs são “defuzificados” (*defuzzified*) usando o método *centroid defuzzification*, o qual é derivado uma nova fórmula *centroid defuzzification* baseada nos grupos de nível-alfa.
- [101] O software baseado em conhecimento para a análise de modos de falha e efeitos apresentado é denominado WIFA. WIFA é o acrônimo alemão para ‘FMEA baseado em conhecimento’. O software fornece um modelo de informação para construir taxonomias funcionais e estruturais na forma de uma biblioteca para o conhecimento presente no FMEA (produto e processo). Dessa maneira, a biblioteca contém descrições precisas e completas dos produtos e processos, e facilita o reuso posterior dos conhecimentos coletados durante um FMEA. Cada componente da estrutura taxonômica está ligado a pelo menos uma função e tem uma lista definida de modos de falha. Os componentes podem herdar informação do componente pai na taxonomia. Uma função é definida em termos de uma lista de verbos e contém informação sobre a função principal e entradas e saídas da função.
- [102] Método para a aplicação do FMEA baseado na lógica *Fuzzy*, tendo em vista que a interdependência entre os modos de falhas com informações imprecisas e incertas são muito difíceis de serem incorporadas à análise de falhas do FMEA. Sendo assim, aplica-se tal método, que é um software baseado em conhecimentos, e que é construído a partir de conhecimentos e experiências em forma de regras *fuzzy* ‘*If-then*’. Para apoiar a aplicação do método proposto, é apresentado um modelo estrutural de avaliação do software baseado na lógica *Fuzzy* no MatLab.

- [103] Abordagem chamada FuRBaR (*Fuzzy Rule-Based Bayesian Reasoning*) para priorizar falhas no FMEA. A abordagem é baseada em redes Bayesianas para transformar graus de crenças, utilizados para estimar falhas, provenientes das regras baseada na lógica Fuzzy, em probabilidades subjetivas condicionais das redes Bayesianas, de forma a ter uma melhor priorização dos modos de falhas.
- [104] O método FMEA baseado na teoria *Fuzzy* foi construído a partir de conhecimentos e experiências na forma de regras *fuzzy* 'If-then', eliminando a subjetividade dos índices do FMEA.
- [105] Método que combina o conceito de *green design* com os métodos FMEA e TRIZ. O método proposto é baseado na estrutura do FMEA e leva em consideração o meio ambiente, segurança e saúde. O FMEA é modificado para definir o 'eco-modo de falhas' e priorizá-los através do Eco-RPN. Os índices 'severidade', 'ocorrência' e 'detecção' são transformados nos índices 'impacto ambiental', 'perspectiva do consumidor' e 'cumprimento de regulamentação'. Para propor melhorias para o projeto (*design*), levando em consideração eco-inovações, é utilizado o método TRIZ. O TRIZ leva em consideração parâmetros de engenharia e de princípios inventivos. Com o TRIZ é elaborada uma matriz de contradição que auxilia na descoberta de soluções viáveis. Além do TRIZ, também é utilizado um *checklist* chamado *eco-failure* (eco-falha). O *eco-failure* guia projetistas ou engenheiros na descoberta de deficiências do produto. O *eco-failure* e o TRIZ compensam a falta de experiência dos engenheiros e diminuem o tempo de um *brainstorm*.
- [106] O software de racionalização baseada em modelo é chamado RODON. O RODON pode ser usado para a aplicação do FMEA, e envolve uma lógica matemática a qual depende de um diagrama de bloco funcional que captura a "topologia" do sistema. Topologia refere-se à inter-conectividade dos componentes do sistema. O sistema pode ser simulado para capturar modos de falhas.

APÊNDICE F – INSTRUMENTO DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO PROCESSO DE APLICAÇÃO DOS MÉTODOS FMEA E DRBFM SOB A PERSPECTIVA DA CONFORMIDADE COM PRÁTICAS DESCRITAS NA LITERATURA

Se você for tem conhecimentos e experiência na aplicação do DFMEA, do PFMEA, e do DRBFM, por favor, responda as questões deste questionário referentes a esses métodos.

Nome do respondente: _____ . Data: __/__/____

Cargo/função: _____.

Empresa: _____.

A. De acordo como sua percepção, avalie, de **maneira geral** e não de uma aplicação específica, a aplicação do DFMEA/PFMEA/DRBFM na empresa, assinalando “**sim**” ou “**não**” para as seguintes sentenças (itens de avaliação).

A1. O DRBFM é aplicado quando um projeto (*design*)/requisito é alterado (mudança de engenharia, condições de uso do produto, legislação, etc.).

() Sim () Não

A2. O DRBFM é aplicado regularmente pelos engenheiros nas atividades diárias e são realizadas revisões de projetos (*design reviews*) por um time de especialistas.

() Sim () Não

A3. O DFMEA é aplicado em projetos de produto (*designs*) e tecnologias totalmente novos.

() Sim () Não

A4. O PFMEA é aplicado em projetos de produto e tecnologias totalmente novos.

() Sim () Não

A5. Nas revisões de projeto do DRBFM é incluído na equipe um especialista que não tenha familiaridade com o projeto do produto em análise

() Sim () Não

A6. O DFMEA e o DRBFM são integrados um com o outro.

() Sim () Não

A7. O DFMEA/DRBFM é integrado ao plano de testes (verificação e avaliação).

DFMEA () Sim () Não

DRBFM () Sim () Não

A8. O documento do DFMEA/PFMEA é considerado um documento vivo, isto é, a aplicação do DFMEA/PFMEA é contínua no processo de desenvolvimento de produto e não é considerada como sendo um evento único (é atualizado sempre que o produto/processo é modificado, um novo modo de falha é identificado, ou uma nova ação de melhoria é implementada).

DFMEA () Sim () Não

PFMEA () Sim () Não

A9. DFMEAs/PFMEAs anteriores de produtos/processos semelhantes são usados como ponto de partida para novos DFMEAs/PFMEAs.

DFMEA () Sim () Não

PFMEA () Sim () Não

A10. Falhas ocorridas em campo e definidas em testes são incorporadas nas análises de DFMEA/PFMEA.

DFMEA () Sim () Não

PFMEA () Sim () Não

A11. A terminologia usada para descrever um item do formulário DFMEA/PFMEA/DRBFM (modos de falha, efeitos de falha, causas de falha, etc.) é padronizada.

DFMEA () Sim () Não

PFMEA () Sim () Não

DRBFM () Sim () Não

A12. O PFMEA é completo de maneira que todos os passos do processo são considerados.

() Sim () Não

A13. Os pontos preocupantes apresentados pelo líder do time são cautelosamente revisados pelos especialistas no início das sessões de revisões de projeto do DRBFM, evitando qualquer omissão.

() Sim () Não

A14. As sessões de revisão de projeto do DRBFM são focadas nos pontos chave a serem discutidos.

() Sim () Não

A15. Por meio de discussão entre especialistas de diversas áreas, nas revisões de projetos do DRBFM, são descobertos vários problemas que não iriam ser notados pelos projetistas.

() Sim () Não

Agora, de acordo como sua percepção, avalie em uma escala de 10 pontos (1 = “Discordo plenamente,” e 10 = “Concordo plenamente”), de **maneira geral** e não de uma aplicação específica, o **grau** em que as seguintes sentenças (itens de avaliação) são verdadeiras para a aplicação do DFMEA/PFMEA/DRBFM na empresa. Por favor, assinale um número da escada para cada item de avaliação.

A16. A taxa e os custos de falhas são reduzidos como resultado da aplicação desses métodos.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

A17. Reclamações de clientes e recalls são reduzidas como resultado da aplicação desses métodos.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

A18. A qualidade interna é melhorada, ou seja, defeitos, refugos, retrabalhos, etc. são reduzidos como resultado da aplicação desses métodos.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

A19. A aplicação desses métodos ajuda a reduzir o ciclo de desenvolvimento.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

A20. A aplicação desses métodos ajuda a reduzir o número de protótipos.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

A21. Se o DRBFM não fosse feito, sérios problemas não seriam notados.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

A22. As discussões são profundas e todos os membros do time contribuem ativamente

DFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

PFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

DRBFM 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

A23. O líder do time é bem preparado para conduzir/facilitar as sessões de análise de falhas potenciais.

DFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

PFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

DRBFM 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

A24. Os projetistas e processistas aceitam receber críticas do seu trabalho pelos membros do time.

DFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

PFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

DRBFM 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

A25. Não existe corporativismo entre os membros do time.

DFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

PFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

DRBFM 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Se sua resposta para a afirmação **A25** foi abaixo de **3**, por favor, avalie a questão **A26**.

B26. O corporativismo impede que problemas sejam identificados em relação aos itens analisados.

DFMEA () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6 () 7 () 8 () 9 () 10

PFMEA () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6 () 7 () 8 () 9 () 10

DRBFM () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6 () 7 () 8 () 9 () 10

B. Quais das ferramentas abaixo são utilizadas para auxiliar o DFMEA/PFMEA/DRBFM?

	Nunca	Às vezes	Quase sempre	Sempre
FTA (<i>Fault Tree Analysis</i> – Análise da Árvore de Falhas).	()	()	()	()
Software específico.	()	()	()	()
Diagrama de Ishikawa (espinha de peixe).	()	()	()	()
Diagrama de Blocos (DFMEA/DRBFM).	()	()	()	()
Diagrama de parâmetros (<i>Parameter Diagram</i>) (DFMEA/DRBFM).	()	()	()	()
Diagrama de fluxo do processo (PFMEA).	()	()	()	()
Gráfico de Pareto.	()	()	()	()
<i>Checklists</i> de possíveis falhas.	()	()	()	()
Outras. Quais?	()	()	()	()
_____.	()	()	()	()
_____.	()	()	()	()
_____.	()	()	()	()
_____.	()	()	()	()

Se a empresa utiliza um **software** de FMEA/DRBFM, por favor, responda os itens da seção **C**. Se a empresa aplica o método **FTA**, por favor, responda os itens da seção **D**.

C. Por favor, responda as questões seguintes sobre o software de apoio à realização do DFMEA/PFMEA/DRBFM.

C1. Qual o nome do software utilizado?

_____.

C2. O uso do software facilita a integração dos membros do time (trabalho em equipe) e facilita que todos os membros colaborem com a análise.

Sim Não

C3. O uso do software garante a padronização da terminologia utilizada para nomear funções, modos de falha, efeitos de falha, causas de falha, controles, etc.

Sim Não

C4. A utilização do software otimiza o tempo do time.

Sim Não

C5. O uso do software facilita o gerenciamento de dados de entrada e saída das análises

Sim Não

C6. O software utilizado possibilita visualizar as informações da análise em múltiplas vistas (tabela, árvore hierárquica, etc.)?

Sim Não

Se você respondeu **sim** para a questão **C6**, responda a questão **C7**. Se sua resposta foi **não**, então passe para o item **C8**.

C7. Este recurso é útil?

Sim Não

C8. O uso do software facilita o gerenciamento das ações de melhoria recomendadas (rastrear/acompanhar o progresso de implementação e garantir que as melhorias são implementadas).

Sim Não

C9. O uso do software facilita encontrar e reusar informações importantes (dados ou frases) de DFMEAs/PFMEAs existentes, diminuindo os esforços no desenvolvimento de novas análises.

Sim Não

C10. Facilita a confecção de relatórios como dados do DFMEA/PFMEA/DRBFM para apoiar a tomada de decisões.

Sim Não

D. Por favor, responda os itens seguintes sobre a aplicação do método FTA (*Fault Tree Analysis* – Análise da Árvore de Falhas) na empresa.

D1. Quando o FTA é aplicado, ele é usado para:

	Nunca	Às vezes	Quase sempre	Sempre
D1a. Descobrir causas raiz.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
D1b. Descobrir efeitos finais.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
D1c. Fornecer uma maior compreensão do funcionamento de um sistema.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
D1d. Identificar possíveis causas múltiplas que poderiam levar a uma falha.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
D1e. Outros. Quais?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

D2. O FTA serve como uma análise preliminar para a elaboração do DFMEA/PFMEA/DRBFM.

Sim Não

D3. O FTA é feito durante as sessões de DFMEA/PFMEA/DRBFM quando necessário.

Sim Não

D4. A árvore de falhas, ao estabelecer de maneira lógica o encadeamento das falhas de um sistema, facilita a elaboração do DFMEA/PFMEA/DRBFM.

Sim Não

D5. Visualizando a árvore de falhas, é mais fácil determinar o efeito e a causa raiz de uma falha.

Sim Não

B6. A construção de uma árvore de falhas é realizada por um time multifuncional.

Sim Não

B7. A árvore de falhas ajuda na determinação de ações de melhoria.

Sim Não

B8. O FTA ajuda na compilação de informações para planejamento de testes.

Sim Não

Fim. Obrigado!

APÊNDICE G – INSTRUMENTO DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO PROCESSO DE APLICAÇÃO DOS MÉTODOS FMEA E DRBFM SOB A PERSPECTIVA DA CAPABILIDADE

Se você for **membro do time** de DFMEA, ou/e PFMEA, ou/e DRBFM, por favor, responda as questões deste questionário referentes ao(s) método(s) o(s) qual(is) você faz parte do time.

A. Informações contextuais

Nome do respondente: _____ . Data: __/__/____

Cargo/função: _____ .

Empresa: _____ .

A1. Você é membro do(s) time(s) de:

- DFMEA.
- PFMEA.
- DRBFM.

A2. Quantas vezes você já participou de uma sessão de análise de falhas potenciais?

- Uma
- Duas
- Três
- Quatro
- Cinco
- Seis
- Mais de seis

A3. Dentre as seguintes áreas funcionais, qual mais se aproxima da que você é associado(a)?

- Qualidade
- Operações/Produção/Manufatura
- Pesquisa e Desenvolvimento
- Marketing
- Compras
- Suporte ao cliente
- Outra (por favor, especifique). _____ .

A4. Dentre os seguintes cargos, qual mais se aproxima do seu?

- Operador
- Técnico
- Engenheiro
- Supervisor
- Gerente
- Outro (por favor, especifique). _____ .

B. Avaliação da qualidade do processo de análise de falhas potenciais na empresa

Baseado na sua experiência em aplicar os métodos de análise de falhas potenciais assinalados na questão **A1**, por favor, avalie em uma escala de 10 pontos (1 = “Discordo plenamente,” e 10 = “Concordo plenamente”), de **maneira geral** e não de uma aplicação específica, o **grau** no qual as seguintes sentenças (itens de avaliação) são verdadeiras para o *processo* de aplicação desse(s) método(s) na empresa. Por favor, assinale um número da escada para cada item de avaliação.

B1. Recursos suficientes são alocados para a execução do processo (materiais, apoio de um facilitador, apoio de um patrocinador, etc.)

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B2. É claro quem é responsável em fazer o que no processo (planejamento, trabalho prévio, o processo em si, etc.)

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B3. As pessoas participantes têm conhecimento suficiente sobre a aplicação deste processo.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B4. As pessoas certas são envolvidas (mix de habilidades cross-funcional, conhecimento sobre a aplicação, etc.) e possuem autoridade sancionada pela gerência.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B5. Tempo despendido na execução do processo é suficiente (isto é, nem muito nem pouco tempo).

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Se sua resposta para **B5** foi menor que **4**, por favor, avalie as questões **B6** e **B7**, senão pule para a questão **B8**.

B6. A execução do processo é muito lenta e por isso o tempo não é suficiente.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B7. Não existe tempo suficiente para se analisar com a profundidade necessária cada uma das falhas potenciais.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B8. O nível de análise das falhas é adequado e todas alternativas são esgotadas.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B9. Documentos e informações de entrada têm qualidade suficiente (completo, acurado, etc.).

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Se sua resposta para **B9** foi menor que **4**, cite o que está faltando ou qual é a deficiência.

B10. Documentos e informações de entrada são usados de maneira efetiva no processo.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B11. A aplicação dos métodos (questão 2a) acontece no momento certo (as alterações no produto/processo podem ser facilmente implementadas e não comprometem o orçamento do projeto (*project*)), isto é, existe tempo para reagir e garantir o sucesso do projeto (*project*).

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B12. Está claro como esses métodos devem ser aplicados (política clara, regras/critérios de decisão, o que cada pessoa tem que fazer, etc.).

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Se sua resposta para **B12** foi menor que **4**, por favor, cite o que está faltando ou qual é a deficiência.

B13. O processo é bem definido e documentado, com sub-passos claros, saídas dos sub-passos, formulários/*templates* padrão, etc.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B14. O controle de versão dos documentos/formulários do processo é realizado de maneira efetiva por meio de gestão da configuração.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B15. O processo para uso desses métodos são monitorados e controlados (dimensões de desempenho, tais como, qualidade, completude, eficiência, etc., são medidas e gerenciadas).

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B16. O time segue o processo de aplicação dos métodos prescrito pela empresa.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B17. Os membros do time mostram respeito um pelo outro durante as sessões.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B18. É dado a cada membro do time tempo suficiente para eles colocarem seus pontos de vista.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Fim. Obrigado!

APÊNDICE H – INSTRUMENTO DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DOS MÉTODOS FMEA E DRBFM

Se você tiver bons **conhecimentos e experiência** na aplicação dos métodos **DFMEA, PFMEA, e DRBFM**, porém no momento você **não é membro do time** de nenhum desses métodos, por favor, responda as questões deste questionário referentes à qualidade dos *resultados* da aplicação desses métodos.

A. Informações contextuais

Nome do respondente: _____ . Data: __/__/____

Cargo/função: _____ .

Empresa: _____ .

A1. Você é membro do(s) time(s) de:

- DFMEA.
- PFMEA.
- DRBFM.

A2. Quantas vezes você já participou de uma sessão de análise de falhas potenciais?

- Uma
- Duas
- Três
- Quatro
- Cinco
- Seis
- Mais de seis

A3. Dentre as seguintes áreas funcionais, qual mais se aproxima da que você é associado(a)?

- Qualidade
- Operações/Produção/Manufatura
- Pesquisa e Desenvolvimento
- Marketing
- Compras
- Suporte ao cliente
- Outra (por favor, especifique). _____ .

A4. Dentre os seguintes cargos, qual mais se aproxima do seu?

- Operador
- Técnico
- Engenheiro
- Supervisor
- Gerente
- Outro (por favor, especifique). _____ .

B. Avaliação da qualidade da aplicação do DFMEA/PFMEA/DRBFM na empresa

De acordo como sua percepção, avalie, de maneira geral e não de uma aplicação específica, a aplicação do DFMEA/PFMEA/DRBFM na empresa, assinalando “**sim**” ou “**não**” para as seguintes sentenças (itens de avaliação).

B1. O DFMEA/PFMEA é bem profundo de maneira que causas/mecanismos de falhas potenciais são identificados para *todos* os modos de falha.

DFMEA () Sim () Não

PFMEA () Sim () Não

B2. O DFMEA/PFMEA é completo de maneira que todas as colunas de seu formulário são discutidas e preenchidas.

DFMEA () Sim () Não

PFMEA () Sim () Não

B3. Toda característica funcional de projeto (*design*) que engenheiros têm responsabilidade são endereçadas no DFMEA.

DFMEA () Sim () Não

B4. Todas as verificações de projeto (*design*) são listadas por causa no DFMEA.

DFMEA () Sim () Não

B5. Controles de processo são listados por causa no PFMEA.

PFMEA () Sim () Não

B6. As mudanças de engenharia (intencionais e incidentais) e suas razões são verificadas e descritas em detalhes no DRBFM.

DRBFM () Sim () Não

Agora, de acordo como sua percepção, avalie em uma **escala de 10 pontos (1 = “Discordo plenamente,” e 10 = “Concordo plenamente”)**, de maneira geral e não de uma aplicação específica, o **grau** em que as seguintes sentenças (itens de avaliação) são verdadeiras para a aplicação do DFMEA/PFMEA/DRBFM na empresa. Por favor, assinale um número da escada para cada item de avaliação.

B7. Modos de falhas esperados ou típicos são definidos.

DFMEA () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6 () 7 () 8 () 9 () 10

PFMEA () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6 () 7 () 8 () 9 () 10

B8. Todos os riscos razoáveis são endereçados/ identificados.

DFMEA () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6 () 7 () 8 () 9 () 10

PFMEA () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6 () 7 () 8 () 9 () 10

B9. Efeitos de falhas são considerados em relação ao usuário final.

DFMEA () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6 () 7 () 8 () 9 () 10

PFMEA () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6 () 7 () 8 () 9 () 10

B10. Índices de severidade, ocorrência e detecção parecem ser consistentes com os modos de falhas.

DFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

PFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B11. O DFMEA/PFMEA é bem profundo de maneira que todos os modos de falhas parecem ser identificados, incluindo modos de falhas relacionados com o uso do cliente e a aplicação do sistema.

DFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

PFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B12. As ações de melhoria especificadas são sempre implementadas.

DFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

PFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B13. As melhorias implementadas são registradas no DFMEA/PFMEA e os índices (severidade, ocorrência, detecção e RPN) são atualizados.

DFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

PFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B14. Falha com baixo RPN ainda podem trazer problemas significativos.

DFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

PFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B15. A definição dos índices de risco (severidade, ocorrência e detecção) é tão subjetiva que perde sua validade.

DFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

PFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B16. Problemas de projeto (*design*) que possam causar problemas de manufatura/montagem são identificados no DFMEA.

DFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B17. O DFMEA inclui causas de falhas relacionadas com integração e interface de sistemas, subsistemas ou componentes.

DFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B18. O PFMEA está relacionado ao controle de processo.

PFMEA 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B19. O DRBFM ajuda a focar nas modificações intencionais e incidentais, para descobrir todos os problemas escondidos e, portanto prevenir qualquer omissão.

DRBFM 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B20. O DRBFM incentiva a criatividade na busca por falhas potenciais e a descoberta de boas ideias para resolver problemas.

DRBFM 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

B21. A linguagem utilizada é clara e específica, isto é, não são usadas expressões/frases vagas e imprecisas. Sempre que possível são incluídas informações quantificáveis.

DFMEA ()1 ()2 ()3 ()4 ()5 ()6 ()7 ()8 ()9 ()10

PFMEA ()1 ()2 ()3 ()4 ()5 ()6 ()7 ()8 ()9 ()10

DRBFM ()1 ()2 ()3 ()4 ()5 ()6 ()7 ()8 ()9 ()10

B22. As informações inseridas nos formulários são bem detalhadas.

DFMEA ()1 ()2 ()3 ()4 ()5 ()6 ()7 ()8 ()9 ()10

PFMEA ()1 ()2 ()3 ()4 ()5 ()6 ()7 ()8 ()9 ()10

DRBFM ()1 ()2 ()3 ()4 ()5 ()6 ()7 ()8 ()9 ()10

B23. Para todo modo de falha são determinadas as causas raiz.

DFMEA ()1 ()2 ()3 ()4 ()5 ()6 ()7 ()8 ()9 ()10

PFMEA ()1 ()2 ()3 ()4 ()5 ()6 ()7 ()8 ()9 ()10

DRBFM ()1 ()2 ()3 ()4 ()5 ()6 ()7 ()8 ()9 ()10

Fim. Obrigado!

REFERÊNCIAS

AHLSTRÖM, P.; KARLSSON, C. Longitudinal Field Studies. In: Karlsson, C. (Ed.). **Researching Operations Management**. New York: Routledge - Taylor & Francis Group, 2009.

AIAG. Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) - Reference Manual, Fourth Edition, 2008.

AJAYI, M.; SMART, P. Innovation and learning: exploring feedback from service to design. **Journal of Engineering Manufacture**, v.222 Part B, p.1195-1199. 2008.

ALLAN, L. Change Point Analysis and DRBFM: A Winning Combination. **Reliability Edge**, v.9, n.2, p.16-21. 2009.

ALMANNAI, B.; GREENOUGH, R.; KAY, J. A decision support tool based on QFD and FMEA for the selection of manufacturing automation technologies. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v.24, n.4, p.501-507. 2008.

APIS Informationstechnologien GmbH. Disponível em <<http://www.apis.de/en>>. Acesso em: 23 Nov. 2009.

ARCIDIACONO, G.; CAMPATELLI, G. Reliability improvement of a diesel engine using the FMETA approach. **Quality and Reliability Engineering International**, v.20, n.5, p.143-154. 2004.

ARVANITOYANNIS, I. S.; VARZAKAS, T. H. Application of failure mode and effect analysis (FMEA), cause and effect analysis and Pareto diagram in conjunction with HACCP to a potato chips manufacturing plant. **International Journal Of Food Science And Technology**, v.42, n.12, p.1424--1442, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.

BARBER, B.M.; DARROUGH, M.N. Product Reliability and Firm Value: The Experience of American and Japanese Automakers, 1973-1992. **Journal of Political Economy**, v.104, n.5, p.1084-1099. 1996.

BARCZAK, G.; GRIFFIN, A.; KAHN, K.B. PERSPECTIVE: Trends and Drivers of Success in NPD Practices: Results of the 2003 PDMA Best Practices Study. **Journal of Product Innovation Management**, v.26, n.1, p.3-23. 2009.

BATES, H.; HOLWEG, M.; LEWIS, M.; OLIVER, N. Motor vehicle recalls: Trends, patterns and emerging issues. **Omega**, v.35, n.2, p.202-210. 2007.

BELL, D.; COX, L.; JACKSON, S.; SCHAEFER, P. Using causal reasoning for automated failure modes and effects analysis (FMEA). In: RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1992, Las Vegas, NV, USA. **Proceedings...** Las Vegas, NV, USA: IEEE Xplore, 21-23 Jan. 1992, 1992, p.343-353.

BERTRAND, J.W.; FRANSOO, J.C. Modelling and Simulation. In: C. Karlsson (Ed.). **Researching Operations Management**. New York: Routledge - Taylor & Francis Group, 2009. Modelling and Simulation

BERTSCHE, B. **Reliability in Automotive and Mechanical Engineering: Determination of Component and System Reliability**. Berlin: Springer. 2008.

BIOLCHINI, J.; MIAN, P.G.; NATALI, A.C.C.; TRAVASSOS, G.H. **Systematic Review in Software Engineering: Relevance and Utility**. PESC-COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 2005

BLUVBAND, Z.; POLAK, R.; GRABOV, P. Bouncing Failure Analysis (BFA): The unified FTA-FMEA methodology. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2005, Israel. **Proceedings...** Israel, 2005, p.463-467.

BOOKER, J.D.; RAINES, M.; SWIFT, K.G. **Designing Capable and Reliable Products**: Elsevier. 2001.

BRAGLIA, M.; FANTONI, G.; FROSOLINI, M. The house of reliability. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.24, n.4, p.420-440. 2006.

BRALLA, J. G. **Design for excellence**. New York: McGraw-Hill, 1996.

BRAUN, P.; PHILIPPS, J.; SCHÄTZ, B.; WAGNER, S. Model-Based Safety-Cases for Software-Intensive Systems. **Electronic Notes in Theoretical Computer Science**, v.238, n.4, p.71-77. 2009.

CHAO, L.P.; ISHII, K. Design Process Error Proofing: Failure Modes and Effects Analysis of the Design Process. **Journal of Mechanical Design**, v.129, n.5, p.491-551. 2007.

CHIOZZA, M.L.; PONZETTI, C. FMEA: A model for reducing medical errors. **Clinica Chimica Acta**, v.404, n.1, p.75-78. 2009.

CLARKE, C. **Automotive Production Systems and Standardisation: From Ford to the Case of Mercedes-Benz**: Physica-Verlag Heidelberg. 2005.

CLARKSON, P.J.; SIMONS, C.; ECKERT, C. Predicting Change Propagation in Complex Design. **Journal of Mechanical Design**, v.126, n.5, p.788-797. 2004.

CLEMENS, P.L. **Fault Tree Analysis (4th Edition)**: Jacobs SVERDRUP. 2002.

CMMI PRODUCT TEAM. **CMMI for Development, Version 1.2: Improving processes for better products**. Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, August 2006.

COUGHLAN, P.; COUGHLAN, D. Action Research. In: Karlsson, C. (Ed.). **Researching Operations Management**. New York: Routledge - Taylor & Francis Group, 2009.

DANE, F.C. **Research methods**: Brooks/Cole. 1990.

DAVIDSON, W.N., III; WORRELL, D.L. Research Notes and Communications: The Effect of Product Recall Announcements on Shareholder Wealth. **Strategic Management Journal**, v.13, n.6, p.467-473. 1992.

DEVADASAN, S.R.; MUTHU, S.; SAMSON, R.N.; SANKARAN, R.A. Design of total failure mode and effects analysis programme. **International Journal of Quality and Reliability Management**, v.20, n.5, p.551-568. 2003.

DUWE, B.; FUCHS, B.D.; HANSEN-FLASCHEN, J. Failure mode and effects analysis application to critical care medicine. **Critical Care Clinics**, v.21, n.1, p.21-30. 2005.

ECKERT, C.; CLARKSON, P.J.; ZANKER, W. Change and customisation in complex engineering domains. **Research in Engineering Design**, v.15, n.1, p.1-21. 2004.

EISENHARDT, K.M. Building Theory From Case Study Research. **Academy of Management Review**, v.14, n.4, p.532-550. 1989.

ENGWALL, M.; KLING, R.; WERR, A. Models in action: how management models are interpreted in new product development. **R&D Management**, v.35, n.4, p.427-439. 2005.

ERICSON, C. Fault Tree Analysis - A history. In: 17th INTERNATIONAL SYSTEM SAFETY CONFERENCE. August 16-21, 1999, Orlando, FL, USA. **Proceedings...** Orlando, FL, USA: System Safety Society, 1999.

FARRIS, J.A.; VAN AKEN, E.M.; LETENS, G.; ELLIS, K.P.; BOYLAND, J. A Structured Approach for Assessing the Effectiveness of Engineering Design Tools in New Product Development. **Engineering Management Journal**, v.19, n.2, p.31-39. 2007.

FORD, E.C.; GAUDETTE, R.; MYERS, L.; VANDERVER, B.; ENGINEER, L.; ZELLARS, R.; SONG, D.Y.; WONG, J.; DEWEESE, T.L. Evaluation of Safety in a Radiation Oncology Setting Using Failure Mode and Effects Analysis. **International Journal of Radiation Oncology*Biography*Physics**, v.74, n.3, p.852-858. 2009.

FORZA, C. Surveys. In: Karlsson, C. (Ed.). **Researching Operations Management**. New York: Routledge - Taylor & Francis Group, 2009. Surveys

FRANCESCHINI, F.; GALETTO, M. A new approach for evaluation of risk priorities of failure modes in FMEA. **International Journal of Production Research**, v.39, n.13, p.2991-3002. 2001.

GERST, M.; ECKERT, C.; CLARKSON, P.J.; LINDEMANN, U. Innovation in the Tension of Change and Reuse. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, ICED 01, 2001, Glasgow, UK. **Proceedings...** Glasgow, UK: Professional Engineering Publishing, 2001, p.371-378.

GM. Engineering standards: Design Review Based on Failure Modes - GMN11220: General Motors Corporation: 1-9 p. 2005.

GÖNCZY, L.; MAJZIK, I.; HORVÁTH, A.; VARRÓ, D.; BALOGH, A.; MICSKEI, Z.; PATARICZA, A. Tool Support for Engineering Certifiable Software. **Electronic Notes in Theoretical Computer Science**, v.238, n.4, p.79-85. 2009.

GRANTHAM LOUGH, K.A.; STONE, R.B.; TUMER, I.Y. Failure Prevention in Design Through Effective Catalogue Utilization of Historical Failure Events. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v.8(5), p.469-481 2008.

GUIMARÃES, A.C.F.; LAPA, C.M.F. Fuzzy FMEA applied to PWR chemical and volume control system. **Progress in Nuclear Energy**, v.44, n.3, p.191-213. 2004.

HAUNSCHILD, P.R.; RHEE, M. The Role of Volition in Organizational Learning: The Case of Automotive Product Recalls. **Management Science**, v.50, n.11, p.1545-1560. 2004.

HAWKINS, J. M.; ALLEN, R. (Ed.). **Oxford encyclopedic english dictionary**. Oxford: Clarendon, 1994.

HAWKINS, P.G.; WOOLLONS, D.J. Failure modes and effects analysis of complex engineering systems using functional models. **Artificial Intelligence in Engineering**, v.12, p.375-397. 1998.

HOUAISS. Dicionário eletrônico da língua portuguesa. Editora Objetiva, 2007.

HUNT, J.E.; PUGH, D.R.; PRICE, C.J. Failure Mode Effects Analysis: A Practical Application of Functional Modeling. **Applied Artificial Intelligence**, v.9, n.1, p.33-44. 1995.

JAMES, L.R.; DEMAREE, R.G.; WOLF G. Estimating within-group interrater reliability with and without response bias, **Journal of Applied Psychology**, V.69, n.1, p.85-98. 1984.

JAMES, L.R.; DEMAREE, R.G.; WOLF G. r_{wg} : An Assessment of Within-Group Interrater Agreement, **Journal of Applied Psychology**, V.78, n.2, p.306-309. 1993.

JARRAR, Y.F.; ZAIRI, M. Internal transfer of best practice for performance excellence: a global survey. **Benchmarking: An International Journal**, v.7, n.4, p.239-246. 2000.

JOHNSON, K.G.; KHAN, M.K. A study into the use of the process failure mode and effects analysis (PFMEA) in the automotive industry in the UK. **Journal of Materials Processing Technology**, v.139, n.1-3, p.348-356. 2003.

KARA-ZAITRI, C.; KELLER, A.Z.; BARODY, I.; FLEMING, P.V. An improved FMEA methodology. In: RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1991, Orlando, FL - USA. **Proceedings...** Orlando, FL - USA: IEEE press, 1991, p.248-252.

KARLSSON, C. **Researching Operations Management**. New York: Routledge - Taylor & Francis Group. 2009.

KITCHENHAM, B. **Procedures for Performing Systematic Reviews, Technical Report TR/SE-0401**. Department of Computer Science, Keele University and National ICT. Australia. 2004

KMENTA, S.; ISHII, K. Scenario-based failure modes and effects analysis using expected cost. **Journal of Mechanical Design**, v.126, n.6, p.1027-1035. 2004.

KMENTA, S.; ISHII, K.; CHELDELIN, B. Assembly FMEA: A Simplified Method for Identifying Assembly Errors. In: ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS & EXPOSITION, 2003, Washington. **Proceedings...** Washington: ASME, November 16-21, 2003.

KOH, K.Y.; SEONG, P.H. SMV model-based safety analysis of software requirements. **Reliability Engineering & System Safety**, v.94, n.2, p.320-331. 2009.

KRASICH, M. Use of fault tree analysis for evaluation of system-reliability improvements in design phase. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2000, EUA. **Proceedings...** EUA, 2000, p.1-7.

_____. Can Failure Modes and Effects Analysis Assure a Reliable Product? In: RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2007. **Proceedings...** 2007, p.277-281.

LAMBERT, H. Use of fault tree analysis for automotive reliability and safety analysis. In: SAE SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS WORLD CONGRESS, 2003, Detroit, MI (US). **Proceedings...** Detroit, MI (US), 03/08/2004-03/11/2004, 2003.

LAUGLAUG, A.S. Technical-market research: Get customers to collaborate in developing products. **Long Range Planning**, v.26, n.2, p.78-82. 1993.

LDOCE. The Longman Dictionary of Contemporary English Online. Disponível em <<http://www.ldoceonline.com/>>. Acesso em 27 Jan. 2009.

LEE, B. Using Bayes belief networks in industrial FMEA modeling and analysis. In: RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2001, Philadelphia. **Proceedings...** Philadelphia: IEEE press, 22-25 Jan. 2001, 2001, p.7-15.

LEVIN, M.; KALAL, T.T. **Improving Product Reliability: Strategies and Implementation**. West Sussex, England: Wiley. 2003.

MCDERMOTT, R.E.; MIKULAK, R.J.; BEAUREGARD, M.R. **The Basics of FMEA, 2nd Edition**. New York,: Productivity Press. 2009.

MCKINNEY, B.T. FMECA, the right way. In: RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1991. **Proceedings...** 1991, p.253-259.

MILAZZO, M.F.; ANCIONE, G.; LISI, R.; VIANELLO, C.; MASCHIO, G. Risk management of terrorist attacks in the transport of hazardous materials using dynamic geoevents. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v.22, n.5, p.625-633. 2009.

MONTGOMERY, T.A.; MARKO, K.A. Quantitative FMEA automation. In: RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1997, Philadelphia, PA, USA. **Proceedings...** Philadelphia, PA, USA, 1997, p.226-228.

MONTI, S.; JEFFERSON, J.; MERMEL, L.; PARENTEAU, S.; KENYON, S.; CIFELLI, B. Use of failure mode and effect analysis (FMEA) to improve active surveillance for methicillin-resistant Staphylococcus aureus (MRSA) at a university-affiliated medical center. **American Journal of Infection Control**, v.33, n.5, p.e158-e158. 2005.

MORGAN, J.M. **High performance product development: a systems approach to a lean product development process**. 408p. Doctoral Thesis (Doctor of Philosophy) - Industrial and Operations Engineering, University of Michigan, Michigan, 2002.

MORGAN, J.M.; LIKER, J.K. **The Toyota Product Development System: Integrating People, Process and Technology**: Productivity Press. 2006.

PENTTI, H.; ATTE, H. **Failure mode and effects analysis of software - based automation systems**. STUK - Radiation and Nuclear Safety Authority. Helsinki: August 2002, p.37. 2002

PICKARD, K.; MÜLLER, P.; BERTSCHE, B. Synergies of FMEA and other quantitative quality methods for an optimized quality assurance. In: 5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON QUALITY, RELIABILITY, AND MAINTENANCE: QRM 2004, 2004, Oxford, England. **Proceedings...** Oxford, England: Wiley-Blackwell, 2004, p.35-38.

PRICE, C.J.; PUGH, D.R.; WILSON, M.S.; SNOOKE, N. The Flame system: automating electrical failure mode and effects analysis (FMEA). In: RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1995. **Proceedings...** 1995, p.90-95.

PRICE, C.J.; TAYLOR, N.S. Automated multiple failure FMEA. **Reliability Engineering & System Safety**, v.76, n.1, p.1-10. 2002.

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

RAUSAND, M.; HØYLAND, A. **System Reliability Theory: Models, Statistical Methods and Applications**. Second Edition, Wiley: New York, 2004.

RELIASOFT. Disponível em <<http://www.reliasoft.com.br/xfmea/>>. Acesso em 23 Nov. 2009.

REPENNING, N.P.; STERMAN, J.D. Nobody Ever Gets Credit for Fixing Problems that Never Happened: Creating and Sustaining Process Improvement. **California Management Review**, v.43, p.64-88. 2001.

RHEE, M.; HAUNSCHILD, P.R. The Liability of Good Reputation: A Study of Product Recalls in the U.S. Automobile Industry. **Organization Science**, v.17, n.1, p.101-117. 2006.

RHEE, S.; ISHII, K. Predicting Cost of Poor Quality and Reliability for Systems Using Failure Modes and Effects Analysis. In: IMECE DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCES, 2004, Anaheim. **Proceedings...** Anaheim: ASME, November 13-19, 2004, p.

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. 2003.

RIZZOTTO, R.A. **Recall - 4 milhões de carros com defeito de fábrica**. Rio de Janeiro: RDE Empreendimentos Publicitários Ltda. 2003.

ROMANO, L.N. **Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas**. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F.A.; AMARAL, D.C.; TOLEDO, J.C.; SILVA, S.L.; ALLIPRANDINI, D.H.; SCALICE, R.K. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo**. Editora Atlas. 2006.

SCHMITT, R.; KOHLMANN, H.A.; HAMMERS, C. Lean Development mit DRBFM. **Management und Qualität**, v.1-2, p.10-12. 2008.

SCHMITT, R.; KRIPPNER, D.; BETZOLD, M. Geringere Fehlerkosten – höhere Zuverlässigkeit. **Qualität und Zuverlässigkeit**, v.51, n.06, p.66-68. 2006.

SCHMITT, R.; KRIPPNER, D.; HENSE, K.; SCHULZ, T. Keine Angst vor Änderungen! Robustes Design für innovative Produkte. **Qualität und Zuverlässigkeit**, v.52, n.03, p.24-26. 2007.

SCHORN, M. Entwicklung mit System: Wie Toyota von DRBFM profitiert. **Management und Qualität**, v.12, p.8-11. 2005.

SCHORN, M.; KAPUST, A. DRBFM - die Toyota Methode. **Vdi Z Integrierte Produktion**, v.147, n.7/8, p.67-69. 2005.

SCIPIONI, A.; SACCAROLA, G.; CENTAZZO, A.; ARENA, F. FMEA methodology design, implementation and integration with HACCP system in a food company. **Food Control**, v.13, n.8, p.495-501. 2002.

SCOTT, B.S.; WILCOCK, A.E.; KANETKAR, V. A survey of structured continuous improvement programs in the Canadian food sector. **Food Control**, v.20, n.3, p.209-217. 2009.

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 and Reliability Management**, v.25, n.9, p.899-912. 2008.

SHAHIN, A. Integration of FMEA and the Kano Model: An Exploratory Examination. **International Journal of Quality and Reliability Management**, v.21, n.7, p.731-746. 2004.

SHIMIZU, H.; IMAGAWA, T.; NOGUCHI, H. Reliability Problem Prevention Method for Automotive Components - Development of GD3 Activity and DRBFM (Design Review Based Failure Mode). In: INTERNATIONAL BODY ENGINEERING CONFERENCE, 2003. SAE International, **Proceedings...** 2003, p.371-376.

SHIMIZU, H.; NOGUCHI, H. Reliability Problem Prevention Method of Stimulating Creativity and Visualizing Problems : 2nd Report, Reliability Problem Prevention Method for System Development. In: TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. C, 2005. **Proceedings...** 2005, p.230-237.

SHIMIZU, H.; OTSUKA, Y.; NOGUCHI, H. Reliability Problem Prevention Method of Stimulating Creativity and Visualizing Problems : 3rd Report, Efficiency Improvement of Finding Misunderstood Problems in Design Process; For Useful Tool of On the Job Training(Machine Elements and Manufacturing). In: TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS., 2007. **Proceedings...** 2007, p.935-943.

SHIMIZU, H.; YOSHIMURA, T. Reliability Problem Prevention Method of Stimulating Creativity Needed to Notice Problems. In: TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. C, 2004. **Proceedings...** 2004, p.243-250.

SOBEK, D.K.; LIKER, J.K.; WARD, A.C. Another Look at How Toyota Integrates Product Development. **Harvard Business Review**, v.76, n.4, p.36-50. 1998.

SOBEK, D.K.; WARD, A.C.; LIKER, J.K. Toyota's principles of set-based concurrent engineering. **Sloan Management Review**, v.40, n.2, p.67-83. 1999.

SOUZA, M.C.F. **Análise da utilização da manufatura virtual no processo de desenvolvimento de produtos**. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Mecânica - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SPATH, P.L. Using failure mode and effects analysis to improve patient safety. **AORN**, v.78, n.1, p.15-37. 2003.

STAMATIS, D.H. **Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution**: ASQC Quality Press. 1995.

STONE, R.; TUMER, I.; STOCK, M. Linking product functionality to historic failures to improve failure analysis in design. **Research in Engineering Design**, v.16, n.1, p.96-108. 2005.

THIVEL, P.X.; BULTEL, Y.; DELPECH, F. Risk analysis of a biomass combustion process using MOSAR and FMEA methods. **Journal of Hazardous Materials**, v.151, n.1, p.221-231. 2008.

TRANFIELD, D.; DEYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, v.14, n.3, p.207-202. 2003.

TSAROUHAS, P.H.; ARVANITTOYANNIS, I.S.; AMPATZIS, Z.D. A case study of investigating reliability and maintainability in a Greek juice bottling medium size enterprise (MSE). **Journal of Food Engineering**, v.95, n.3, p.479-488. 2009.

TSAROUHAS, P.H.; ARVANITTOYANNIS, I.S.; VARZAKAS, T.H. Reliability and maintainability analysis of cheese (feta) production line in a Greek medium-size company: A case study. **Journal of Food Engineering**, v.94, n.3-4, p.233-240. 2009.

TUMER, I.Y.; STONE, R.; BELL, D. Requirements for a failure mode taxonomy for use in conceptual design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 2003, Stockholm. **Proceedings...** Stockholm, 2003.

UNITED STATES MILITARY STANDARD. **MIL-STD-1629A**: Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis. Department of Defense, Washington, DC, 1980.

VESELY, W.E.; GOLDBERG, F.F.; ROBERTS, N.H.; HAASL, D.F. **Fault tree handbook. NUREG-0492**. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (USA). Office of Nuclear Regulatory Research. 1981.

VEZZOLI, C.; MANZINI, E. **Design for Environmental Sustainability**: Springer. 2008.

VOSS, C. Case Research in Operations Management. In: Karlsson, C. (Ed.). **Researching Operations Management**. New York: Routledge - Taylor & Francis Group, 2009.

WALIA, G.S.; CARVER, J.C. A systematic literature review to identify and classify software requirement errors. **Information and Software Technology**, v.51, n.7, p.1087-1109. 2009.

WARD, A.C.; SOBEK, D.K.; LIKER, J.K.; CHRISTIANO, J.J. The Second Toyota Paradox: How Delaying Decisions Can Make Better Cars Faster. **Sloan Management Review**, v.36, n.3, p.43-61. 1995.

WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Disponível em <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Software>>. Acesso em 20 Maio 2010.

WIRTH, R.; BERTHOLD, B.; KRÄMER, A.; PETER, G. Knowledge-based support of system analysis for the analysis of Failure modes and effects. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v.9, n.3, p.219-229. 1996.

WOMACK, J.P.; JONES, D.T.; ROOS, D. **A Máquina que Mudou o Mundo**. São Paulo: Editora Campus. 1992.

YANG, G. **Life Cycle Reliability Engineering**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. 2007.

YIN, R.K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. Porto Alegre: Bookman. 2005.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)