

DIMAS CAMPOS DE AGUIAR

AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE PREVENÇÃO DE FALHAS EM
PROCESSOS DE MANUFATURA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA COM
METODOLOGIA DE AUXÍLIO À DECISÃO

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista, para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica na área de
Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Valério Antonio Pamplona Salomon

Guaratinguetá

2007

**“AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE PREVENÇÃO DE FALHAS EM
PROCESSOS DE MANUFATURA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA COM
METODOLOGIA DE AUXÍLIO À DECISÃO”**

DIMAS CAMPOS DE AGUIAR

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. VALÉRIO ANTONIO PAMPLONA SALOMON
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. FERNANDO AUGUSTO SILVA MARINS
Unesp-Feg


Prof. Dr. CARLOS HENRIQUE PEREIRA MELLO
UNIFEI/Itajubá

DADOS CURRICULARES

DIMAS CAMPOS DE AGUIAR

NASCIMENTO	03.05.1977 – TAUBATÉ / SP
FILIAÇÃO	Dalmo Toledo de Aguiar Celina Miriam Campos de Aguiar
1995/1999	Curso de Graduação Engenharia Mecânica - Universidade de Taubaté
2004/2007	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

Ao meu amigo,
Augusto Saturnino Martins Santos
(Guzinho)

AGRADECIMENTOS

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

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

Ao *Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins* pela receptividade e apoio oferecido desde meu ingresso na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, além das críticas que proporcionaram grandes melhorias neste trabalho.

Ao *Prof. Dr. Carlos Henrique Pereira Mello* pela atenção e contribuição para a melhoria da apresentação da pesquisa.

Ao *Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri* pelo crédito e pela inspiração que suas aulas proporcionaram.

Aos colegas de estudo *Ângelo Ferreira, Julio César Gonçalves, Marcelo Dias Carneiro, Raul Vitor Mendes Pereira* e *Romildo Mariano* por compartilharem os momentos de incerteza.

Aos companheiros de trabalho *Benedito Valério, Heloiza Alves, Marcos Bessa, Mariana Obara Kay* e *Ruben Elizei* pelo incentivo e pelo crédito desde o início.

Aos meus amigos *Hugo Marques de Almeida* e *Carlos Eduardo de Oliveira Andrade* por terem, mesmo em meio a tantos compromissos, comparecido à defesa.

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

AGUIAR, D.C. **Avaliação de sistemas de prevenção de falhas em processos de manufatura na indústria automotiva com metodologia de auxílio à decisão.** 2007. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

RESUMO

Nos últimos anos, várias novas plantas industriais para a produção de veículos automotores foram construídas e estão em operação no Brasil. Esse fato, aliado às mudanças estruturais dos fabricantes em todo o mundo, gerou novas relações entre as montadoras e seus fornecedores de autopeças. As montadoras adotaram um processo de delegação produtiva junto a seus fornecedores. Lançada em 1999, a ISO/TS 16949 tem como objetivo atender aos requisitos normativos das principais montadoras americanas, alemãs, francesas e italianas. Entre estes requisitos tem-se o desenvolvimento e revisão de análises do modo e efeito de falha (FMEA, *Failure Mode and Effect Analysis*) para a aplicação em desenvolvimento de projetos de produtos e processos de manufatura. Mesmo com um formulário semelhante a um roteiro, o preenchimento de um FMEA de processo é uma atividade complexa, na qual as relações entre as colunas e os critérios de pontuação adotados são de vital importância para o seu desempenho. Em muitos casos o FMEA é usado mais por exigências normativas do que por seus benefícios, sendo que o seu incorreto emprego pode acarretar em desperdício de recursos. Tendo um foco em empresas do setor automotivo, o presente estudo visa apresentar uma proposta para a avaliação do desempenho da aplicação do FMEA de processo, identificando as irregularidades que ocorrem em seu uso, de forma a hierarquizá-las de acordo com a gravidade e obtendo uma sistemática de avaliação de cada caso. Para tanto, foi realizado um embasamento teórico sobre a aplicação de FMEA de processo associado a um estudo de caso para avaliação do uso do FMEA nas organizações selecionadas pela aplicação da metodologia de auxílio à decisão. Especificamente são utilizados o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e os conjuntos nebulosos (*Fuzzy Sets*), onde, a partir da literatura, são discutidos os conceitos fundamentais associados à teoria de tais

métodos. Como resultado, tem-se a aceitação ou não dos FMEAs averiguados e, pela possibilidade de variação dos níveis de aceitação, a aplicação se mostrou adequada.

PALAVRAS-CHAVE: FMEA de processo, AHP, conjuntos fuzzy

AGUIAR, D.C. **Evaluation of failure prevention systems in manufacture processes at automotive industry with decision-making methodology.** 2007. 131 f. Dissertation (Master Degree in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

ABSTRACT

In recent years, new several industrial plants for the vehicles production were built and are in operation in Brazil. That fact, added to the global changes in the automotive production, generated new relationships between the assembly plants and their suppliers, that it resulted in the adoption of a process of productive delegation with the manufacturers of automotive parts. Maid in 1999, ISO/TS 16949 has as objective assists to the normative requirements of the main American, Germans, French and Italian assembly plants. Among these requirements there is the development and revision of analyses in the mode and faulire effect (FMEA, Failure Mode and Effect Analysis) for the application in development of projects of products and manufacture processes. Even with a form similar to an itinerary, the completion of a process FMEA is a complex activity, which the relationships between the columns and the punctuation criteria adopted are very important for its performance. In many cases FMEA is used more by normative demands than for their benefits, and its incorrect job can result in resources waste. With a focus in companies of the automotive section, this study seeks to present a proposal for the evaluation of the of Process FMEA application, identifying the irregularities that happen in its use, in way the hierarchy in agreement with the gravity and obtaining a systematic of evaluation of each case. For that, a theoretical rising was accomplished about the application of process FMEA associated to a case study for evaluation of FMEA aplication in the selected organizations by the application of the decision-making methodology. Specifically will be used the method AHP (Analytic Hierarchy Process) and the Fuzzy Sets, which, starting from the literature, the fundamental concepts are discussed associates to the theory of this methods. As result, there is the acceptance or not of discovered FMEAs and, for the possibility of variation of the acceptance levels, the application was shown appropriate.

KEYWORDS: Process FMEA, AHP, fuzzy sets

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Custos da Falha	25
Figura 2 - Custos da Falha	26
Figura 3 - Formulário de FMEA.....	35
Figura 4 - Procedimento para preenchimento do formulário	36
Figura 5 - Critério de análise e sistema de ranqueamento para a severidade	39
Figura 6 - Pontuação da severidade da falha.....	39
Figura 7 - Critérios para a estimativa do índice de severidade.....	40
Figura 8 - Seqüência de atividades da primeira etapa do FMEA	40
Figura 9 - Critério de análise e sistema de ranqueamento para a ocorrência da falha	42
Figura 10 - Pontuação da ocorrência	43
Figura 11 - Pontuação da ocorrência	43
Figura 12 - Pontuação da ocorrência	44
Figura 13 - Seqüência de atividades da segunda etapa do FMEA.....	44
Figura 14 - Critério de análise e sistema de ranqueamento para a detecção.....	46
Figura 15 - Pontuação da detecção	46
Figura 16 - Pontuação da detecção	47
Figura 17 - Pontuação da detecção	47
Figura 18 - Seqüência de atividades da etapa 3 do FMEA.....	48
Figura 19 - Seqüência de atividades da etapa 4 do FMEA.....	49
Figura 20 - Diferentes pontos de vista para avaliação da severidade, ocorrência e detecção	52
Figura 21 - Fluxograma geral do AHP.....	57
Figura 22 - Exemplo de estrutura hierárquica do AHP	58
Figura 23 - Definição das prioridades da hierarquia do AHP	59
Figura 24 - Síntese das preferências do tomador de decisão AHP	60
Figura 25 - Desempenho dos três fornecedores do mesmo item.....	61
Figura 26 - Estrutura hierárquica para o exemplo de seleção de fornecedores	62
Figura 27 - Escala de valores para a comparação paritária no método AHP.....	63
Figura 28 - Resultado da avaliação dos fornecedores	71

Figura 59 - Avaliação gráfica para a etapa 2 do FMEA da Empresa 1	100
Figura 60 - Avaliação gráfica para a etapa 3 do FMEA da Empresa 1	100
Figura 61 - Avaliação gráfica para a etapa 4 do FMEA da Empresa 1	101
Figura 62 - Gráfico do critério de aceitação para a avaliação dos FMEAs	106
Figura 63 - Gráfico da desfuzzificação para o FMEA da Empresa 1	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Julgamento e importância dos atributos	64
Tabela 2 - Prioridade relativa para os atributos Preço, Qualidade do Produto e Entrega.....	64
Tabela 3 - Índice de coerência.....	65
Tabela 4 - Julgamentos e desempenho dos fornecedores com relação à Qualidade do Produto.....	67
Tabela 5 - Julgamentos e desempenho dos fornecedores com relação à Entrega .	67
Tabela 6 - Cálculo do desempenho dos fornecedores com relação ao Preço.....	67
Tabela 7 - Regras de combinações dos graus de pertinência.....	74
Tabela 8 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o Cliente 1	77
Tabela 9 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o Cliente 2	78
Tabela 10 -Regras e valores de decisão (α -cut) para o Cliente 3	78
Tabela 11 -Regras e valores de decisão (α -cut) para o Cliente 4	78
Tabela 12 -Regras e valores de decisão (α -cut) para o Cliente 5	78
Tabela 13 -Maiores valores das variáveis resposta para cada Cliente	80
Tabela 14 -Julgamentos e prioridade das irregularidades identificadas para a etapa 1 do FMEA.	88
Tabela 15 -Julgamentos e prioridade das irregularidades identificadas para a etapa 2 do FMEA	89
Tabela 16 -Julgamentos e prioridade das irregularidades identificadas para a etapa 3 do FMEA.	90
Tabela 17 -Julgamentos e prioridade das irregularidades identificadas para a etapa 4 do FMEA.	92
Tabela 18 -Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 1	101
Tabela 19 -Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 2	102
Tabela 20 -Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 3	102
Tabela 21 -Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 4	102
Tabela 22 -Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 5	103
Tabela 23 -Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 6	103

Tabela 24 -Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 7	103
Tabela 25 -Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 8	104
Tabela 26 -Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 9	104
Tabela 27 -Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 10 ..	105
Tabela 28 -Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 11 ..	105
Tabela 29 -Maiores valores das variáveis resposta para cada FMEA.....	106
Tabela 30 -Pontuação final de cada FMEA e respectivos laudos	108
Tabela 31 -Pontuação final de cada FMEA e respectivos laudos	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	Analytic Hierarchy Process
APQP	Advanced Product Quality Planning
ARP	Aerospace Recommended Practice
CEP	Controle Estatístico do Processo
D	Pontuação de Detecção do FMEA
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
IQA	Instituto da Qualidade Automotiva
ISO	International Organization Standardization
MIL-STD	Normas do Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NPR	Número de Prioridade de Risco
O	Pontuação de Ocorrência do FMEA
PO	Pesquisa Operacional
QFD	Desdobramento da Função Qualidade
QS-9000	Quality Systems Requirements
S	Pontuação de Severidade do FMEA
TFS	Triangle Fuzzy Sets
TS	Technical Specification

LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

$\alpha-cut$	Valor de decisão
CR	Razão de Coerência
λ	Autovalor da matriz de julgamentos
n	Ordem da matriz de julgamentos
μ	Pertinência do peso
$\mu(x)$	Função de Pertinência
RI	Índice de coerência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DA PESQUISA	19
1.2 DECLARAÇÃO DOS OBJETIVOS DA PESQUISA	21
1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA	21
1.4 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	24
1.5 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	26
2 FMEA	28
2.1 HISTÓRICO	28
2.2 CONCEITUAÇÃO	29
2.3 BENEFÍCIOS DA APLICAÇÃO	31
2.4 APLICAÇÃO DO FMEA DE PROCESSO	32
2.5 O FORMULÁRIO DO FMEA	34
2.6 ETAPA 1	37
2.7 ETAPA 2	41
2.8 ETAPA 3	45
2.9 ETAPA 4	48
2.10 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PREENCHIMENTO DO FORMULÁRIO DO FMEA	51
3 METODOLOGIA DE AUXÍLIO À DECISÃO	53
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	53
3.2 DECISÕES COM MÚLTIPLOS CRITÉRIOS	53
3.3 CONJUNTOS NEBULOSOS OU <i>FUZZY SETS</i>	68
4 APLICAÇÃO	82
4.1 IDENTIFICAÇÃO DAS DIFICULDADES NA APLICAÇÃO DO FMEA	82
4.1.1 Identificação das irregularidades referentes à Etapa 1 de execução do FMEA	84
4.1.2 Identificação das irregularidades referentes à Etapa 2 de execução do FMEA	84
4.1.3 Identificação das irregularidades referentes à Etapa 3 de execução do FMEA	85
4.1.4 Identificação das irregularidades referentes à Etapa 4 de execução do FMEA	85
4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP	87
4.3 PONTUAÇÃO DOS FMEAs POR ETAPA DE EXECUÇÃO	92
4.4 ATRIBUIÇÃO DE NOTAS PARA OS FMEAS COM APLICAÇÃO DOS CONJUNTOS <i>FUZZY</i>	96
5 CONCLUSÕES	110
5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	110
5.2 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	112

5.3 PROPOSTAS PARA NOVAS PESQUISAS	112
Referências bibliográficas	114
ANEXO A – FMEAs das empresas analisadas	119
APÊNDICE 1 – Regras <i>fuzzy</i> para a primeira situação de avaliação dos desempenho dos FMEAs.....	130
APÊNDICE 2 – Regras <i>fuzzy</i> para a segunda situação de avaliação dos desempenho dos FMEAs.....	132
APÊNDICE 3 – Cálculos da Desfuzzificação pelo método do baricentro .	134

1 INTRODUÇÃO

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DA PESQUISA

Nos últimos anos, várias novas plantas industriais para a produção de veículos automotores foram construídas e entraram em operação no Brasil. Esse fato, aliado às mudanças estruturais dos fabricantes em todo o mundo, gerou novas relações entre as montadoras e seus fornecedores de autopeças, onde a cadeia automotiva brasileira apresenta-se cada vez mais em linha com sua equivalente cadeia global (ALVES FILHO, 2002). Este tipo de relação, que as montadoras estabelecem com os seus fornecedores, de certa forma transfere a eles os ônus das estratégias de mercado.

O quadro de mudanças foi caracterizado por uma reestruturação organizacional marcada pela introdução de modernos métodos de gestão e controle da qualidade dos produtos, que resultou num aumento na produtividade. Porém este aumento somado ao aquecimento do mercado proporcionou um impacto sobre o setor, caracterizado não só pela necessidade de uma intensa recuperação do atraso tecnológico acumulado nos anos anteriores, mas também com o surgimento efetivo da terceirização, que veio a deslocar muitos empregados para empresas subcontratadas.

As montadoras adotaram um processo de delegação produtiva junto a seus fornecedores (PEREIRA e GEIGER, 2005). Esta prática não ficou restrita às montadoras, uma vez que os fornecedores de primeiro nível, também deslocaram parte de suas atividades produtivas para empresas atuantes nos níveis mais inferiores da cadeia de fornecimento. Assim, muitas pequenas e médias empresas atuantes em outras cadeias produtivas se inseriram na cadeia de fornecimento da indústria automotiva.

A ramificação da cadeia produtiva resulta no desenvolvimento de pequenos e médios fornecedores e possui grandes benefícios, tanto para as grandes empresas como para as médias e pequenas. Porém, nota-se a dificuldade destas empresas em se enquadrar no perfil da indústria automotiva. Gonzalez (2006) destaca que o setor automobilístico possui uma relação cliente-fornecedor bastante particular devido às severas exigências no que se diz respeito à qualidade do produto e garantia da

qualidade que os fornecedores devem apresentar a fim de que contratos possam ser firmados e mantidos ao longo do tempo. Tal relação teve maior significância após o desenvolvimento de um padrão normativo para os sistemas de gestão da qualidade dos fornecedores da indústria automobilística mundial. Lançada em 1999, a ISO/TS 16949, que de certa forma substituiu a antiga norma QS-9000, tem como objetivo atender aos requisitos normativos das principais montadoras americanas, alemãs, francesas e italianas. A atual versão da ISO/TS 16949:2002 incorpora também requisitos das montadoras orientais.

Entre os requisitos da ISO/TS 16949:2002 tem-se o desenvolvimento e revisão de análises do modo e efeito de falha (FMEA, *Failure Mode and Effect Analysis*) para a aplicação em desenvolvimento de projetos de produtos e processos de manufatura.

Dessa forma, a pesquisa desenvolve uma investigação, por meio de estudo de casos em empresas do setor automotivo, abordando o emprego do FMEA de processos, pela exposição da consequência das dificuldades das empresas dos níveis mais inferiores da cadeia automotiva desenvolverem a cultura necessária para a correta aplicação desta ferramenta. O método de pesquisa utilizado foi o de levantamento de dados de várias empresas. Contudo, não se utilizou questionário e sim de formulários de FMEA de processo submetidos a uma empresa fornecedora de primeiro nível na cadeia automotiva no interior do estado de São Paulo.

Esta dissertação propõe a aplicação da metodologia de auxílio à decisão para a análise da aplicação do FMEA. Especificamente serão utilizados o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e os conjuntos nebulosos (*Fuzzy Sets*), onde, a partir da literatura, serão discutidos os conceitos fundamentais associados à teoria de tais métodos. Estes métodos serão aplicados no estudo sobre as práticas atuais de realização do FMEA em algumas empresas pertencentes à cadeia automotiva nacional. Após a coleta de dados, é aplicado o método AHP e na sequência, os conjuntos nebulosos. O método AHP é utilizado para a priorização das irregularidades quanto à gravidade de sua ocorrência e os conjuntos nebulosos para avaliação do desempenho da aplicação do FMEA. Também serão apresentados os critérios, formulários e procedimentos a serem utilizados nas abordagens para a execução deste trabalho.

1.2 DECLARAÇÃO DOS OBJETIVOS DA PESQUISA

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar uma proposta para a avaliação do desempenho da aplicação do FMEA de Processo em empresas do segmento automotivo. Para suplementar o objetivo geral, a pesquisa desenvolve os seguintes objetivos específicos:

- a) Desenvolver embasamento teórico a fim de se estabelecer uma conceituação detalhada da aplicação do FMEA de processo, avaliando diferentes abordagens vários autores e buscando o sequenciamento mais adequado para as análises seqüentes;
- b) Levantar na literatura as dificuldades que ocorrem durante a elaboração do FMEA de processo e identificar a ocorrência de irregularidades em sua aplicação pela análise de documentos;
- c) Hierarquizar as irregularidades identificadas de acordo com a gravidade de sua ocorrência, utilizando-se para isso o método AHP;
- d) Atribuir notas para os FMEAs avaliados por meio da aplicação de conjuntos *fuzzy*.

1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Conforme definem Silva e Menezes (2004), as pesquisas podem ser classificadas de acordo com sua natureza, forma de abordagem, objetivos e procedimentos técnicos.

Do ponto de vista da sua natureza, em básica ou aplicada, sendo que este estudo se enquadra em pesquisa aplicada, pois os conhecimentos gerados são de possível aplicação em um problema prático.

Do ponto de vista da forma de abordagem do problema, em quantitativa ou qualitativa. A abordagem qualitativa é a mais adequada para o trabalho em questão, pois as avaliações e discussões são baseadas na interpretação de fenômenos, não requerendo o uso de técnicas estatísticas e considerando tudo que pode ser quantificável, traduzindo em números opiniões e informações para posterior análise e classificação.

Do ponto de vista de seus objetivos, uma pesquisa pode ser classificada em descritiva, exploratória ou explicativa (GIL, 2002). Este estudo se classifica como exploratório, pois envolve levantamento bibliográfico e análise de exemplos.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, uma pesquisa pode ser bibliográfica, documental, experimental, levantamento, estudo de caso, *expost-facto*, pesquisa-ação e pesquisa participante (GIL, 2002). Devido ao seu caráter exploratório, esta pesquisa pode ser classificada como um estudo de caso. Com a realização deste estudo de caso, pretende-se atingir o objetivo geral de realizar uma avaliação da utilização de FMEA de Processo em empresas do segmento automotivo.

Voss, Tsikriktsis e Frohlich (2002) afirmam que, num estudo de caso, é possível usar diferentes casos de uma mesma organização para estudar assuntos diferentes, ou pesquisar o mesmo assunto em uma variedade de contextos na mesma empresa. Desta forma, o emprego deste método de pesquisa se justifica por esta uniformidade dos dados, uma vez que todos os FMEAs tratam de um único cliente. Baseado nas proposições das etapas de pesquisa apresentadas por Gil (2002), foram definidas as etapas necessárias para esta pesquisa em estudo de caso conforme apresentado a seguir.

a) Escolha do tema

Segundo Gil (2002) o tema escolhido deve ser de interesse do estudante e o mesmo deve ter bons conhecimentos prévios na área em estudo, assim foi escolhido o tema da pesquisa em questão, pois Silva e Menezes (2004) afirmam que escolher um tema significa eleger uma parcela delimitada de um assunto, estabelecendo limites ou restrições para o desenvolvimento da pesquisa pretendida.

b) Levantamento bibliográfico preliminar

Conforme Silva e Menezes (2004) é importante nesta fase determinar o estado da arte do tema em questão, ou seja, estudar os principais autores e avaliar quais aspectos já foram abordados. Este levantamento bibliográfico preliminar foi realizado à medida que foram sendo definidas os limites para o desenvolvimento desta pesquisa.

c) Formulação do problema

A formulação do problema decorre de um longo processo de reflexão e de imersão em fontes bibliográficas adequadas, sendo que somente a partir do momento

em que o pesquisador tem uma idéia clara daquilo que pretende fazer a respeito do assunto escolhido é que está em condições de iniciar o seu trabalho (GIL, 2002). Esta etapa está diretamente relacionada com a motivação pelo assunto, já que foi possível identificar uma lacuna em termos de avaliação de desempenho da aplicação do FMEA, que passou a ser a maior meta deste estudo.

d) Definição dos tópicos da pesquisa

A pesquisa foi dividida em tópicos para facilitar a organização o sequenciamento das ações, sendo que cada tópico aborda um assunto específico, no caso FMEA, AHP e conjuntos *fuzzy*.

e) Levantamento bibliográfico

Para cada tópico escolhido para a pesquisa, foram selecionados os principais autores relacionados ao assunto em questão. Nesta etapa foram analisadas publicações mais recentes sobre o tema, como artigos de congressos científicos e publicações em periódicos. Conforme afirmam Silva e Menezes (2004), a revisão de literatura elucida o tema, proporciona melhor definição do problema de pesquisa e contribui na análise e discussão dos resultados da pesquisa. Esta atividade foi realizada a partir da pesquisa na base de dados do campus da UNESP e se estendeu ao longo de todo período da pesquisa.

f) Determinação do número de casos

Conforme Gil (2002), os estudos de casos podem ser constituídos tanto de um único quanto de múltiplos casos. O procedimento mais adequado para a determinação do número de casos consiste no adição progressivo de novos casos, até o instante em que se alcança a saturação teórica. No presente estudo, foram analisados onze casos.

g) Coleta de dados

Gil (2002) afirma os resultados obtidos no estudo de caso devem ser provenientes da convergência ou da divergência das observações obtidas em diferentes procedimentos. Silva e Menezes (2001) afirmam que a definição do instrumento de coleta de dados dependerá dos objetivos que se pretende alcançar com a pesquisa e do universo a ser investigado e, quando se utilizam os sentidos na obtenção de dados de determinados aspectos da realidade, o instrumento de coleta de dados aplicado é a

observação. A coleta de dados nesta dissertação se deu mediante análise documental em empresas do segmento automotivo pertencentes ao quadro de fornecedores de uma organização *Tier 1*.

h) Avaliação e análise dos dados

Segundo Silva e Menezes (2004), a análise deve ser feita para atender aos objetivos da pesquisa. Gil (2002) destaca que o estudo de caso se faz dos mais variados métodos de coleta de dados e o processo de análise e interpretação pode envolver diferentes modelos de análise. Neste estudo a análise dos dados é de natureza qualitativa.

i) Conclusões

Fernandes (2005) afirma que as conclusões visam consolidar as proposições em relação à problemática proposta inicialmente. Silva e Menezes (2004) completam esta idéia que nesta etapa o autor tem condições de sintetizar os resultados obtidos com a pesquisa, devendo explicar se os objetivos foram atingidos. Nesta pesquisa os resultados obtidos são demonstrados no Capítulo 5.

1.4 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A relevância da realização deste estudo está associada às exigências do mercado automotivo quanto ao sistema de gestão da qualidade. A aplicação do FMEA de processo proporciona à equipe uma visão geral, apontando os principais modos potenciais de falhas, suas causas e efeitos. Sendo assim possível estabelecer ações preventivas no processo ao invés de ações corretivas, que normalmente geram retrabalho e outros custos extras de mão-de-obra e materiais.

Segundo Craig (2004) um sistema de gestão da qualidade com o foco preventivo é vital para se eliminar a inspeção, reduzir os custos com a qualidade e ainda atender as exigências do cliente. Porém, destaca-se a falta de foco preventivo nos atuais sistemas de gestão da qualidade, onde o principal fator para a tomada de ação ainda é a falta de qualidade e não a prevenção desta, atuando-se no problema do momento e não nos riscos potenciais de eventuais problemas.

Segundo Palady (1997), o FMEA exige um custo da organização, sendo que uma das atividades mais caras são as reuniões, que exigem tempo dedicado pelos membros

da equipe. A eficácia na aplicação do FMEA traduz este custo em forma de investimento, que terá um retorno percebido tanto pelo cliente como pela organização, neste caso em forma de redução de custos com falhas. Palady (1997) ainda afirma que as organizações podem incluir as despesas associadas à implantação do FMEA em uma das três categorias:

- a) Custo de prevenção;
- b) Custo de avaliação;
- c) Custo de falha.

A redução do custo da falha resulta em dividendos maiores em termos de prevenção e avaliação conforme apresentado na Figura 1.

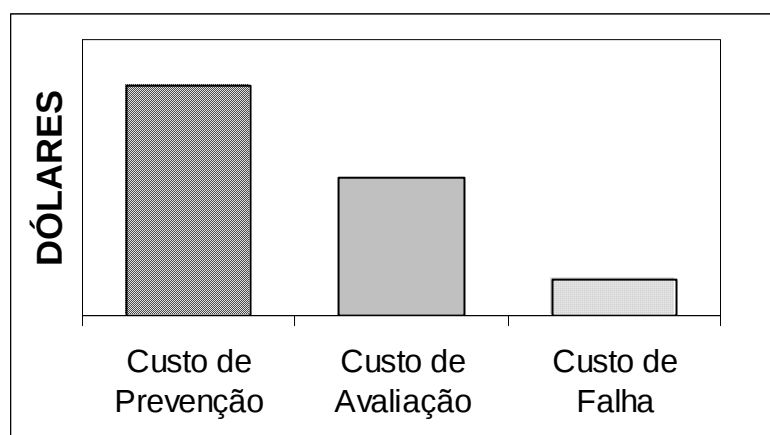


Figura 1 - Custos da Falha

Fonte: Palady (1997)

O custo de desenvolvimento e manutenção do FMEA se enquadra na categoria de custos de prevenção, sendo que uma organização que investe nesta categoria pode ou não receber um retorno substancial do investimento. Este retorno irá depender da eficácia com que as ferramentas de prevenção foram implementadas, exigindo um sólido conhecimento prático destas ferramentas. A Figura 2 apresenta um exemplo com três cenários possíveis que refletem o custo total de uma organização.

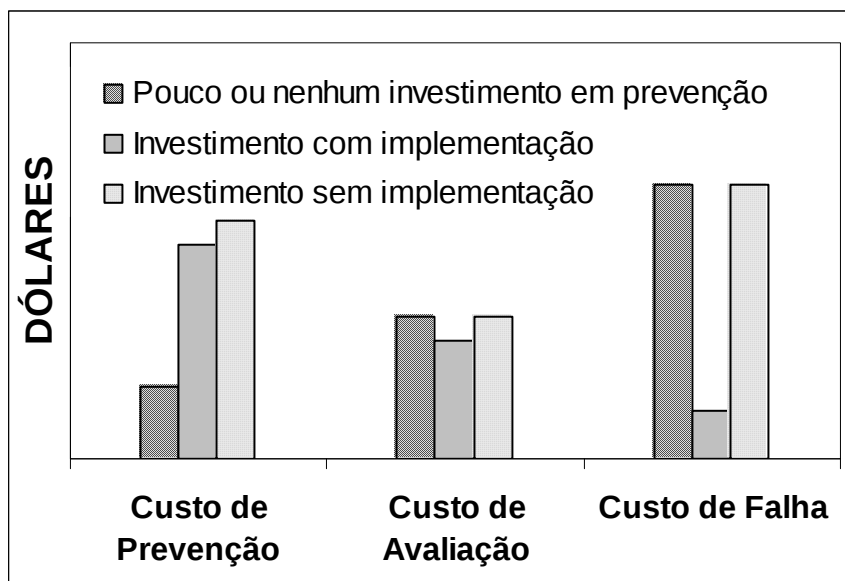


Figura 2 - Custos da Falha

Fonte: Palady (1997)

Quando uma organização investe pouco em prevenção, concentra seus esforços para tratar das falhas após seu impacto no processo ou até mesmo no cliente final. Este tipo de estratégia é totalmente ultrapassada, pois denigre a imagem da empresa colocando-a cada vez mais fora do mercado. Quando uma organização investe em prevenção de modo eficaz em termos de implementação, os retornos são certos em termos de redução de custos com as falhas, já que dificilmente estas virão a ocorrer. Além destas duas situações, existe uma terceira que é a mais grave, onde uma empresa investe pesado no treinamento em prevenção e não existe uma implementação eficaz dos conceitos abordados, gerando uma despesa ainda maior que no primeiro caso, já que os custos da prevenção são somados aos custos das falhas, nesta situação as falhas provavelmente ocorrem.

1.5 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo visa introduzir o tema da pesquisa e o contexto onde ele está inserido, mostrar qual a problemática a ser tratada, delimitando assim o campo da pesquisa e identificando quais os objetivos que se pretende atingir. Adicionalmente procura descrever a metodologia utilizada na pesquisa e sua relevância.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre FMEA, com foco específico em FMEA de processo, onde o formulário de FMEA é apresentado através de um amplo detalhamento da sua execução em uma abordagem passo a passo abrangendo quatro etapas distintas. Neste capítulo também é destacada a importância da correta aplicação do FMEA, sendo que dentre os vários autores pesquisados, neste trabalho adotou-se a abordagem de Palady (1997) para a conceituação das irregularidades devido à maior abrangência desta proposta.

No terceiro capítulo é realizada a revisão bibliográfica sobre a metodologia de auxílio à decisão, na qual é apresentada a abordagem com múltiplos critérios pelo método AHP e os conjuntos nebulosos pela abordagem *fuzzy*, onde, a partir da literatura, serão discutidos os conceitos fundamentais associados à teoria de tais métodos. O objetivo é, além de dar uma base de definições empregadas nos próximos capítulos, rever a seqüência básica de procedimentos teóricos e empíricos para a formalização destas teorias através da apresentação de dois exemplos de aplicação.

O quarto capítulo apresenta o método de coleta de dados sobre as práticas atuais de realização de FMEA em algumas empresas pertencentes à cadeia automotiva nacional, sendo que estes dados são classificados como irregularidades na aplicação do FMEA de processo. Da coleta de dados, é aplicado o método AHP e na seqüência, os conjuntos nebulosos, sendo o método AHP para a priorização das irregularidades quanto à gravidade de sua ocorrência e os conjuntos nebulosos para a avaliação do desempenho da aplicação dos FMEAs em estudo. Também serão apresentados os critérios, formulários e procedimentos a serem utilizados nas abordagens para a execução deste trabalho.

O quinto e último capítulo apresenta as conclusões finais obtidas no estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2 FMEA

2.1 HISTÓRICO

A metodologia de Análise do Modo e Efeito da Falha, conhecida como FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), tem os seus primeiros registros de utilização conceitual em 1949, onde os militares americanos desenvolveram a ferramenta com o objetivo de determinar o efeito da ocorrência de falha em sistemas e equipamentos. A primeira aplicação formal se deu na década de 60, pela indústria aeroespacial dos EUA, especificamente no projeto Apollo da agência norte-americana NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), que, conforme relatado por Fernandes e Rebelato (2006), desenvolveu um método para identificar, de forma sistemática, falhas potenciais processos pela definição de suas causas e efeitos e, a partir disso, definir ações para reduzir ou eliminar o risco associado a essas falhas. De acordo com *Society of Automotive Engineers* (2001), no fim dos anos 1960 e início dos anos 1970, vários grupos profissionais começaram a publicar procedimentos para executar o FMEA, entre estes se destacam:

- a) SAE ARP 926, publicado em 1967 com o título “Procedimento de Análise de Faltas e Falhas” (*Fault / Failure Analysis Procedure*);
- b) MIL STD 1629, publicado em 1974 com o título “Procedimentos para Identificar um Modo de Falha, Efeitos e Análise de Criticidade” (*Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*).

Já nos anos 1980, o FMEA passa a se tornar uma referência para desenvolvimento de processos, a princípio na indústria aeroespacial. Em 1988 a *Ford Motor Company* publicou o manual de instruções de FMEA de projeto (*Design FMEA*) e processo (*Process FMEA*) que aplica a metodologia para processos de manufatura, bem como para desenvolvimento de produtos. (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2001).

De acordo com Silva e Antonietti (2003), a indústria automotiva desenvolveu normas para seus fornecedores visando a garantia da qualidade de seus produtos. De

forma a harmonizar em um único sistema os requisitos de qualidade a serem aplicados na cadeia de fornecedores, as montadoras americanas: *General Motors Corporation*; *Chrysler Corporation* e *Ford Motor Company*; criam em 1994 a Norma QS-9000. Nesta norma foram desenvolvidos os chamados Programas Avançados de Planejamento da Qualidade em Projetos e Processos (APQP) onde dentre outras metodologias foi incorporada a do FMEA com algumas alterações, basicamente nas definições dos critérios de pontuação. Atualmente, os sistemas de qualidade das empresas do setor automotivo seguem a norma ISO/TS 16949:2002 que de certa forma herdou esta exigência do antigo sistema QS 9000.

2.2 CONCEITUAÇÃO

O FMEA é um método analítico usado para detectar e eliminar problemas potenciais de forma sistemática e completa. É uma ferramenta que, em princípio busca evitar falhas que possam ocorrer em projetos de produto ou em processos de fabricação. Este é o objetivo clássico desta técnica, ou seja, detectar falhas antes que se produza uma peça ou produto. Pode-se dizer que, com sua utilização, se está diminuindo as chances do produto ou processo falhar, ou seja, busca-se aumentar sua confiabilidade (HORITA, 2006).

Esta dimensão da qualidade, a confiabilidade, tem se tornado cada vez mais importante para os consumidores, pois, a falha de um produto, mesmo que prontamente reparada pelo serviço da assistência técnica e totalmente coberta por termos de garantia, causa, no mínimo, uma insatisfação ao consumidor ao privá-lo do uso do produto por um determinado tempo. Além disso, cada vez mais são lançados produtos em que determinados tipos de falhas podem ter conseqüências drásticas para o consumidor, nos quais o mau funcionamento pode significar um risco ao usuário. Marconcin (2004) relata que à medida que as causas das falhas são eliminadas pela aplicação do FMEA, a confiabilidade do processo aumenta consideravelmente.

Para Pollock (2005), o FMEA deve ser aplicado para executar a avaliação de risco entendendo quais serão os impactos no cliente se uma entrada de processo vier a falhar. A equipe deve então fazer um exame da ação para minimizar os riscos dos processos e orientar as atividades da melhoria. O FMEA é um documento vivo que

deve ser revisto e atualizado sempre que os processos são mudados. Puente *et al.* (2002) destacam que o FMEA avalia a severidade de cada falha relativamente ao impacto causado aos clientes, bem como sua probabilidade de ocorrência e detecção antes de chegarem às mãos dos clientes.

De acordo com a definição colocada pela *Society of Automotive Engineers* (2002), o FMEA é uma ferramenta na qual se analisa cada modo de falha de um determinado sistema buscando determinar as conseqüências ou os efeitos destes em um outro sistema subsequente, classificando cada modo de falha potencial de acordo com sua severidade e recomendando-se ações para eliminar ou compensar efeitos inaceitáveis. Cassanelli *et al.* (2006) afirmam que o FMEA é conhecido por ser um procedimento sistemático para a análise de um determinado sistema para identificar os modos de falha potenciais, suas causas e efeitos no desempenho do processo, sendo sua análise executada preferivelmente com antecedência, dentro do ciclo de desenvolvimento de forma que a remoção ou a mitigação do modo de falha seja válida e efetiva de modo preventivo. Esta análise pode ser iniciada assim que o processo esteja definido.

Conforme relatado por Layzell e Ledbetter (1998), o FMEA é uma ferramenta de planejamento sistemático e analítico da qualidade que tem a finalidade de identificar e endereçar o que poderia dar errado no decorrer de um determinado processo. O método FMEA traz uma seqüência lógica e sistemática de avaliar as formas possíveis pelas quais um sistema ou processo está mais sujeito às falhas. Conforme abordado por Fernandes e Rebelato (2006), o FMEA avalia a severidade das falhas, a forma como as mesmas podem ocorrer e, caso ocorram, como eventualmente poderiam ser detectadas antes que se resultem em um incômodo para o cliente. Assim, com base nos três fatores: severidade, ocorrência e detecção, o FMEA leva a uma priorização de quais os modos de falha levam um maior risco ao cliente.

Segundo Helman e Andrey (1995), muitas empresas usam o FMEA não somente como meio de prevenção de falhas, mas também como técnica de solução de problemas bem como ferramentas auxiliares no processo de desdobramento da função qualidade.

Segundo Silva e Antonietti (2003), apesar da metodologia FMEA ter sido desenvolvida com um enfoque no projeto de novos produtos e processos, ela passou a ser aplicada de diversas maneiras pela sua grande utilidade. Assim, ela é atualmente utilizada para diminuir as falhas de produtos e processos existentes e para diminuir a probabilidade de falha em processos administrativos, além de algumas aplicações específicas tais como análises de fontes de risco em engenharia de segurança, levantamentos de impactos e aspectos ambientais e na indústria de alimentos. Rotondaro (2002) apresenta como, a partir dos conceitos da técnica do FMEA, é desenvolvido o SFMEA, que previne a ocorrência de falhas durante a produção dos serviços, de modo que estes sempre atendam às expectativas dos clientes.

Andrade e Turrioni (2000) apresentam a utilização do método do FMEA no gerenciamento ambiental, onde os modos de falha e seus efeitos tratam dos aspectos e impactos respectivamente.

2.3 BENEFÍCIOS DA APLICAÇÃO

A vantagem da aplicação do FMEA se dá na medição do processo para a eliminação de seus potenciais pontos fracos, proporcionando meios para a redução do risco de uma falha a um valor aceitável (EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION, 2001). Garcia (2000) ainda destaca que quando elaborado com eficiência, o FMEA torna-se uma ferramenta poderosa na análise do processo, permitindo melhoria contínua e servindo de registro histórico para futuros estudos.

Helman e Andrey (1995) relatam que o FMEA pode ser aplicado na melhoria de processos já existentes a partir da identificação das falhas ocorridas e seu posterior bloqueio, na detecção e bloqueio das falhas potenciais em processos que estão em operação, e na detecção e bloqueio das causas de falhas potenciais de em processos ainda em desenvolvimento.

Stamatis (1995) aponta os benefícios decorrentes da correta condução do FMEA como sendo: melhorar a qualidade, confiabilidade e segurança dos produtos ou serviços; melhorar a imagem e a competitividade da organização; contribuir para aumentar a satisfação do cliente; reduzir o tempo e o custo de desenvolvimento de produtos; determinar a redundância do sistema; identificar procedimentos e

diagnósticos; estabelecer uma prioridade para a tomada de ações de melhoria; identificar características críticas ou significativas; contribuir na análise de um novo processo de montagem ou de manufatura; contribuir na análise de tarefas, sequência ou serviços; estabelecer um foco para a prevenção de defeitos; identificar erros e sua prevenção; contribuir na definição de ações corretivas; assegurar que todas as falhas concebíveis e seus efeitos no sucesso operacional foram considerados; listar as falhas potenciais e identificar a magnitude relativa de seus efeitos; prover a base para o programa de teses durante o desenvolvimento e validação final do sistema, projeto, processo ou serviço; desenvolver critérios rápidos para manufatura, processos, montagem e serviços; prover documentação histórica para futuras referências para auxiliar na análise de campos de falha e considerações nas mudanças de projetos, processos e serviços.

Conforme relatado por Reid (2005), o FMEA tem a capacidade de quantificar os riscos do processo de modo com que os riscos maiores sejam facilmente identificados, o que é de grande relevância já que, no campo da qualidade, as ações a serem tomadas não devem ser definidas de maneira intuitiva.

Para Ellis (2004), o FMEA se apresenta como a ferramenta ideal para medir as lacunas existentes em um sistema de gerenciamento da qualidade devido à sua natureza de aplicação baseada em processos, sua filosofia de trabalho com equipes multifuncionais, sua característica de priorização e sua habilidade de fornecer e manter os status das atribuições requeridas. Com a escassez de recursos dos dias atuais, o uso desta ferramenta permite que a organização determine as vulnerabilidades em seus processos, de forma priorizar as maiores, estabelecendo ações para minimizar e/ou eliminar estes pontos vulneráveis.

2.4 APLICAÇÃO DO FMEA DE PROCESSO

Segundo definido por Tozzi (2004), existe dois tipos básicos de FMEA, sendo que o primeiro deles diz respeito à identificação e análise dos modos potenciais de falha e seus efeitos durante o desenvolvimento de um projeto de determinado produto. O outro tipo de FMEA diz respeito à identificação e análise dos modos potenciais de falha e seus efeitos durante o processo de fabricação do produto. A preocupação em

ambos os tipos de FMEA é única: o impacto dos efeitos provenientes das falhas de projeto ou processo no produto final. A distinção entre FMEA de projeto e FMEA de processo é extremamente importante para nortear a análise que será conduzida. Em um FMEA de produto (ou projeto), por exemplo, as falhas encontradas serão aquelas pertinentes a problemas de projeto, já no FMEA de processo, a análise tem como foco as falhas durante a fabricação do produto ou execução de um determinado serviço.

O FMEA de processo é utilizado pela equipe responsável pela manufatura com a finalidade de assegurar que seja realizada uma avaliação dos modos de falha do processo, assim como suas causas e mecanismos de controle. De uma forma mais precisa, o FMEA de processo é o resumo dos pensamentos da equipe durante o desenvolvimento de um processo e inclui a análise de itens que poderiam falhar baseado na experiência de problemas anteriores. Esta abordagem sistemática acompanha, formaliza e documenta a linha de pensamento normalmente percorrida durante o planejamento da manufatura (INSTITUTO DA QUALIDADE AUTOMOTIVA, 2001).

Tozzi (2004) ainda destaca que para utilizar FMEA de processo, recomenda-se, sempre que possível, fazer o estudo antes do processo ser realizado e não após a ocorrência da falha. Sendo assim, tal autor recomenda elaborar um fluxograma do processo, que possibilite obter uma visão geral de como este processo é afetado pelas diversas áreas da empresa. Com o fluxograma do processo em mãos, torna-se menos complicada a análise do sistema como um todo.

Segundo Slack, Chambers e Johnston (2002), o FMEA tem como objetivo identificar as características do processo que são críticas para os diversos tipos de falhas, sendo ainda um meio para identificar as falhas antes que aconteçam, através de um procedimento constituído por três perguntas chaves questionadas a cada falha:

- a) Qual seria a consequência da falha?
- b) Qual a probabilidade da falha ocorrer?
- c) Em qual probabilidade esta falha é detectada antes que afete o cliente?

Assim, pela relação da severidade do modo de falha, a frequência na qual a falha pode ocorrer e a probabilidade de detecção da falha, o FMEA de processo tem como

meta ou objetivo definir, demonstrar e maximizar soluções de engenharia em resposta à qualidade, confiabilidade, manutenibilidade, custos e produtividade.

O FMEA de processo tem as seguintes características (INSTITUTO DA QUALIDADE AUTOMOTIVA, 2001):

Identifica os modos potenciais de falha do processo relacionados ao produto;

Avalia os efeitos potenciais da falha sobre o cliente;

Identifica as causas potenciais do processo e as variáveis que deverão ser controladas para redução das falhas;

Classifica modos potenciais de falha, estabelecendo assim um sistema de padronização para tomada das medidas preventivas;

Documenta o resultado do processo.

2.5 O FORMULÁRIO DO FMEA

A aplicação do FMEA no processo é registrada em um formulário padrão que é uma espécie de roteiro que reúne os possíveis modos potenciais de falha associados com as causas, efeitos, ações corretivas, entre outros. A Figura 3 apresenta o formulário de FMEA que traz um cabeçalho com informações como equipe envolvida, código da peça, responsável, data e número do FMEA.

Abaixo do cabeçalho, têm-se as colunas que formam o roteiro de preenchimento e acompanhamento das falhas e seus valores correlacionados para cada etapa do processo. O correto relacionamento entre estas colunas é fundamental para a utilização da ferramenta de forma correta e eficaz.

ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS																	
FMEA DE PROCESSO																	
Data Chave : Projeto : Peça : Participantes :							No. FMEA : Pag. / Rev. ____ / ____ Preparado por : Data da FMEA :										
											Ações Resultantes						
Item / Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(S) Potencia(S) de Falha	S E V E .	C L A S .	Causa Potencial (6M) Mecanismos	O C O R .	Controle Preventivo Atual	Controle Detecção Atual	D E T E C	N P R	Ações Recomendadas	Responsabilidade pelas ações recomendadas e os prazos envolvidos	Ação Tomada	S E V E .	O C O R .	D E T E C	N P R

Figura 3 - Formulário de FMEA

Fonte: Instituto da Qualidade Automotiva (2001)

Os fatores severidade, ocorrência e detecção são calculados por especialistas conforme a escala de valores, na maioria das vezes definida de um a dez, baseado em critérios de avaliação geralmente de comum acordo dentro da equipe. Como o RPN é uma medida do risco de fracasso de determinada função o processo, este índice deve ser usado para classificar as falhas e priorizar as ações. São recomendadas ações com prioridade dada às falhas que atingiram o RPN mais alto. Sendo o preenchimento do formulário do FMEA realizado de forma organizada e disciplinada, menores são as chances de se cometer irregularidades na sua aplicação. Entre as referências pesquisadas foram encontrados vários roteiros de atividades que trazem uma seqüência de etapas para o preenchimento da tabela do FMEA. Tay e Lim (2006) e Sharma, Kumar e Kumar (2005) demonstram um resumo do procedimento de preenchimento do FMEA conforme apresentado na Figura 4.

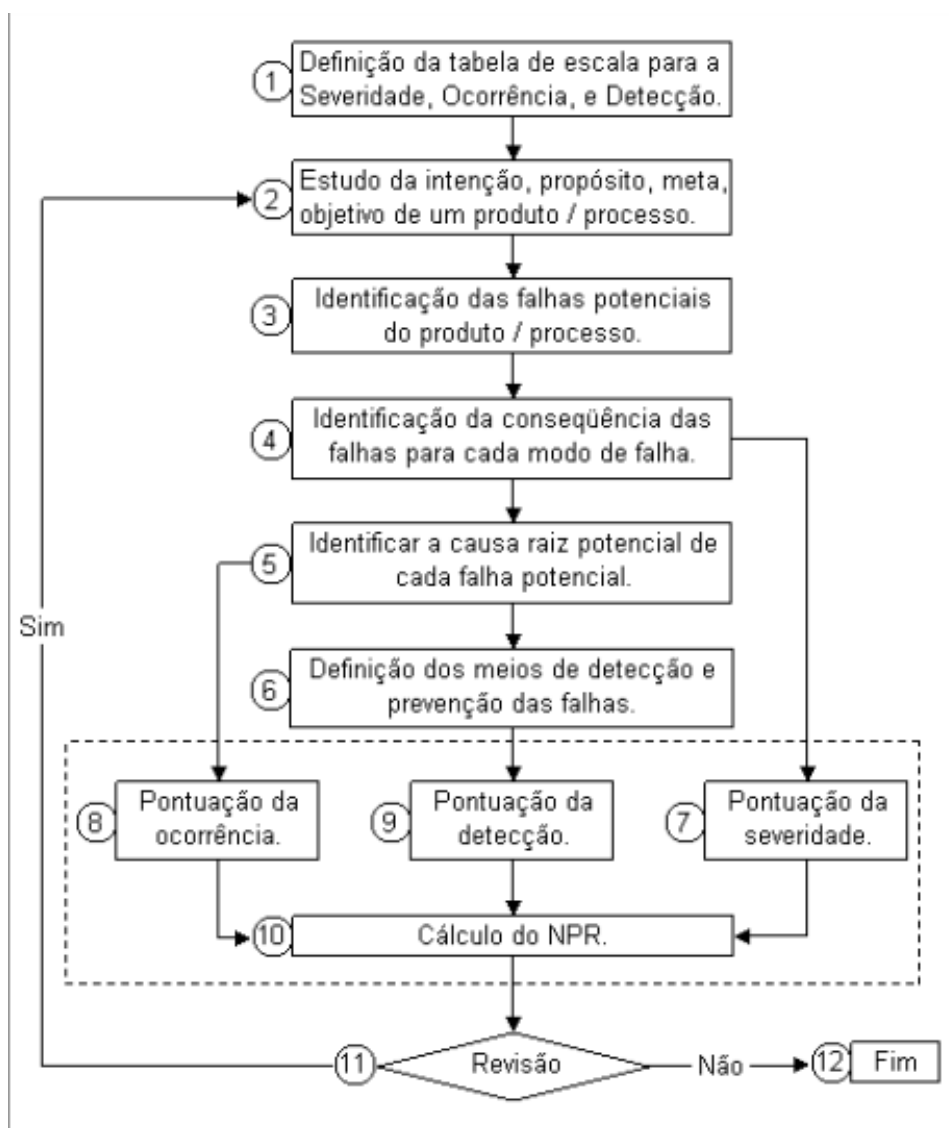


Figura 4 - Procedimento para preenchimento do formulário

Fonte: Tay e Lim (2006); Sharma, Kumar e Kumar (2005)

Segundo Garcia (2000), o FMEA de processo é aplicado para cada operação no plano macro. Para tanto, é necessário que se extraia desse último a seqüência, a máquina e as falhas potenciais associadas a cada operação baseadas no modo, efeito e causa de sua ocorrência. É então estabelecido o controle necessário para prevenir tal falha potencial. Para atingir este nível de detalhamento, o FMEA precisa ser executado por etapas, e o presente estudo propõe a execução dos doze passos do preenchimento da tabela do FMEA de processo apresentada na Figura 4, em quatro etapas conforme apresentado nos próximos tópicos.

2.6 ETAPA 1

A execução do FMEA de processo começa nesta fase, que consiste no preenchimento das colunas: Item / função; Modo de falha potencial; Efeito potencial da falha; Severidade e Classificação. Na primeira etapa, inicialmente são listadas todas as fases do processo produtivo em questão com base na definição do seu diagrama de fluxo, sendo que a coluna item / função deve ter o preenchimento a partir de uma definição do processo ou da operação em análise, avaliando a função da etapa em questão considerando o valor que a mesma agrega no processo como um todo. Conforme recomendado por *Society of Automotive Engineers* (2002), a equipe deveria considerar o desempenho aplicável em termos de material, processo, meio ambiente e padrões de segurança. Indicando o propósito do processo ou operação que são analisados, inclusive informação sobre o projeto, tão concisamente quanto possível descrevendo o sistema, subsistema, ou componente.

Conforme relatado por Fernandes (2005), para cada uma destas etapas são identificados, na maioria das vezes através de técnicas de *Brainstorming*, todos os possíveis modos de falha, ou seja, como cada função do processo pode falhar quando solicitada. O modo de falha potencial trata da maneira pela qual o processo potencialmente falharia em atender aos requisitos do processo ou objetivos do projeto, ou seja, esta coluna deve trazer uma definição da não conformidade na operação em análise e, dependendo do caso, pode haver mais de um modo de falha para cada operação. Palady (1997) recomenda que para o preenchimento desta coluna a equipe busque a definição da falha a partir de uma sentença negativa à função o processo da etapa em questão.

Identificados os modos de falha para cada função deve-se determinar através do conhecimento teórico ou prático o efeito (ou os efeitos) que cada falha causará ao cliente. Na coluna efeito potencial da falha, são registradas estas conseqüências da não conformidade na percepção do cliente, seja este usuário final ou mesmo a próxima operação. Dependendo do caso, pode haver mais de um efeito para um determinado modo de falha. Tozzi (2004) define efeito da falha como sendo a forma como um modo de falha pode afetar o desempenho de um sistema do ponto de vista do cliente.

Posteriormente, cada modo de falha precisa ser classificado quanto à severidade dos seus efeitos. Para tal classificação é realizada uma pontuação baseada em tabelas específicas que orientam a classificação da severidade de acordo com critérios e faixas de valores pré-determinadas. A severidade define uma classificação associada à gravidade do efeito feita por uma pontuação que varia de um a dez, sendo nota um para o menos grave e nota dez para o mais grave (TOZZI, 2004). A severidade não está ligada ao modo de falha, e sim ao efeito potencial da falha, de maneira que, se houver mais de um efeito para um determinado modo de falha, haverá mais de uma pontuação de severidade. Assim, nada impede que se tenham valores diferentes de severidade para um mesmo modo de falha.

Existem alguns fatores de referência que podem ser aplicados como diretriz para a pontuação da severidade. Terninko (2003) adota uma razão para o valor de severidade como sendo um para severidade nenhuma, dois para severidade muito desprezível, três para severidade desprezível, quatro para severidade pequena, cinco para severidade moderada, seis para severidade significativa, sete para severidade grande, oito para severidade extrema, nove para severidade séria e dez para severidade catastrófica.

Outras referências apresentam critérios distintos, a Figura 5 apresenta o critério para a análise e pontuação da severidade adotado por Leal, Pinho e Almeida (2005).

Efeito	Severidade do efeito	Rank
Perigoso	Falha é perigosa, e ocorre sem aviso. Capaz de suspender a operação dos sistemas e/ou envolve aspectos não complacentes com regulamentações governamentais.	10
Sério	Os efeitos podem ser perigosos e/ou envolvem aspectos não complacentes com regulamentações governamentais.	9
Importante	Produto inoperável, com perda da função básica. Sistema inoperante.	8
Impactante	Desempenho do produto sofre impacto. Sistema pode não operar.	7
Significativo	Desempenho do produto é degradado. Funções atreladas ao conforto podem não operar.	6
Moderado	Moderado efeito no desempenho do produto. Produto requer reparos.	5
Baixo	Moderado efeito no desempenho do produto. Produto requer reparos.	4
Desprezível	Efeito desprezível no desempenho do produto ou sistema.	3
Muito desprezível	Efeito muito desprezível no desempenho do produto ou sistema.	2
Nenhum	Nenhum efeito	1

Figura 5 - Critério de análise e sistema de ranqueamento para a severidade

Fonte: Leal, Pinho e Almeida (2005)

Chang, Liu e Wei (2001) trazem uma outra abordagem para referência de pontuação da severidade da falha conforme apresentado na Figura 6.

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

Figura 6 - Pontuação da severidade da falha

Adaptado: Chang, Liu e Wei (2001)

A definição dos valores de pontuação de severidade entre um e dez, apesar de ser a regra mais comum para as pontuações no FMEA, não é uma regra obrigatória. Matos (2004) aborda uma pontuação de severidade que varia de um a cinco conforme apresentado na Figura 7.

Índice	Critérios para a estimativa do índice de severidade
1	É razoável esperar que o cliente não perceba a falha
2	O cliente perceberá a falha mas não ficará insatisfeito por causa dela
3	O cliente perceberá a falha e ficará insatisfeito
4	O cliente ficará insatisfeito mas não tem sua segurança afetada
5	O cliente ficará muito insatisfeito e afeta sua segurança

Figura 7 - Critérios para a estimativa do índice de severidade

Fonte: Matos (2004)

É importante acrescentar que estas divergências não implicam numa queda da eficiência da pontuação da severidade, porém é de extrema importância que a equipe, ao definir o critério de pontuação a ser adotado, não troque de critério ao longo da realização do FMEA.

Como complemento da pontuação de severidade, tem-se a última coluna de preenchimento do FMEA nesta primeira etapa que é a coluna de classificação. Segundo Marconcin (2004), na coluna de classificação têm-se um campo para destacar os modos de falha altamente prioritários e também classificar quaisquer características especiais de produto ou processo por um símbolo específico de acordo com a definição de cada empresa. A Figura 8 apresenta a sequência de atividades desta primeira etapa.

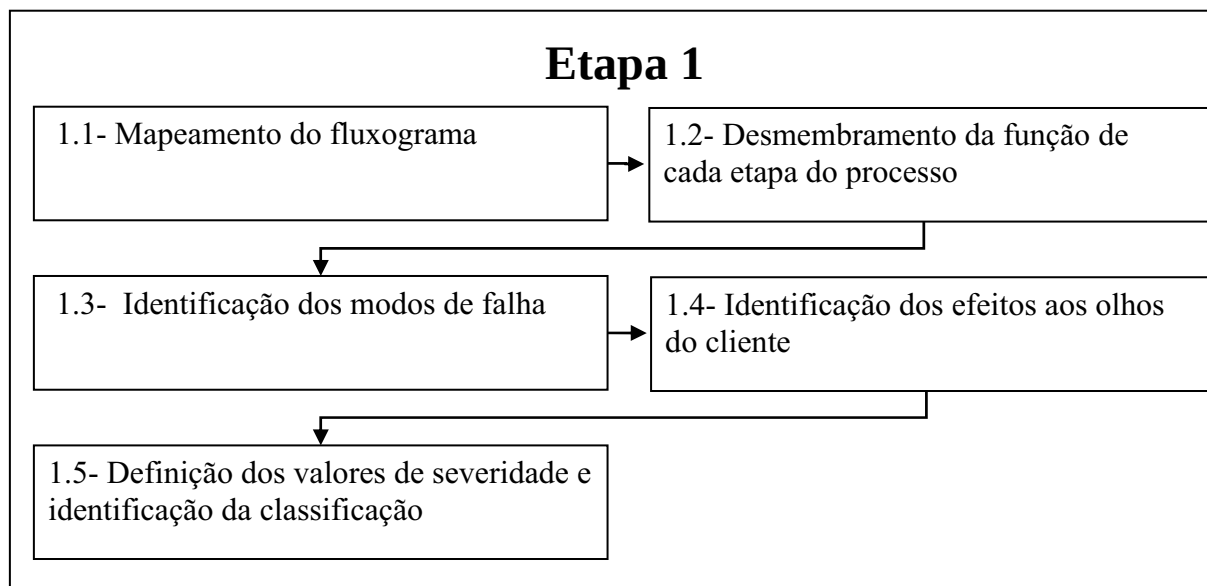


Figura 8 - Sequência de atividades da primeira etapa do FMEA

Alguns autores fazem importantes observações sobre esta primeira etapa de execução do FMEA. Conforme afirmado por Palady (1997), para a definição do modo

de falha, não se deve considerar todos os modos concebíveis, pois isto certamente aumentará o custo e a duração da análise sem nenhum benefício real. Assim, se a equipe decidir que um modo de falha, embora fisicamente possível, não seja prático, esta falha não deve ser incluída no processo.

Existem muitos casos onde a equipe questionará se os modos de falha são realmente modos de falha, causas ou efeitos. Teng *et al.* (2006) ainda comentam que às vezes uma equipe de FMEA pode confundir modo de falha com o efeito. Em linhas gerais, o modo de falha e o efeito descrevem uma mesma coisa, porém sendo vista por dois lados diferentes. O modo de falha como a função da etapa do processo pode vir a falhar e o efeito é como esta falha seria percebida pelo cliente. Nesta abordagem, Palady (1997) recomenda que o modo de falha seja redigido como uma expressão negativa à função do processo, isto vem a fazer com que se garanta a ligação direta entre a função e o modo de falha, facilitando também o apontamento das causas. Rhee e Ishii (2003) afirmam que o índice de severidade mede a gravidade do efeito de um determinado modo de falha. Entretanto este índice deve ser assumido de acordo com o efeito final de uma falha.

2.7 ETAPA 2

Esta segunda fase de execução do FMEA consiste no preenchimento da coluna causa e mecanismo potencial de falha e também da coluna ocorrência. As informações de histórico de sistemas, produtos, processos ou serviços semelhantes e o conhecimento técnico são aplicados em ferramentas como Brainstorming, Diagrama de Causa-Efeito e Gráfico de Pareto para a definição das causas reais e potenciais pelas quais cada modo de falha possa vir a ocorrer (FERNANDES, 2005). Esta abordagem reduz o risco de uma eventual causa ser esquecida.

A coluna de causa e mecanismo potencial de falha define a forma pela qual a falha poderia ocorrer descrita em termos de alguma coisa que possa ser corrigida ou controlada. A idéia é identificar a origem de cada modo de falha. Marconcin (2004) define a causa potencial da falha como uma indicação de uma deficiência, que tem por consequência o modo de falha. Tozzi (2004) destaca que a definição identificação das causas é considerada uma das etapas mais importantes do FMEA.

Com base nestas informações e histórico de ocorrência da falha em situações semelhantes ou reais, cada causa é classificada quanto a sua probabilidade de ocorrer, sendo definida pela pontuação do valor de ocorrência. Esta etapa inclui a identificação das causas dos modos de falha e a frequência ou probabilidade destas causas ocorrerem. Tozzy (2004) afirma que a ocorrência define probabilidade de uma causa ocorrer, e é convencionalmente estimada em uma escala de um a dez, sendo nota um para a menor ocorrência e nota dez para a maior ocorrência. A pontuação deve considerar os dados estatísticos disponíveis e histórico de ocorrências e, assim como no caso da severidade, existem alguns fatores de referência que podem ser aplicados como diretriz para sua pontuação. A Figura 9 apresenta o critério para a análise e pontuação da ocorrência adotado por Leal, Pinho e Almeida (2005).

Probabilidade de Falha	Possíveis taxas de falhas	Rank
Extremamente alta	≥ 1 em 2	10
Muito alta	1 em 3	9
Repetidas falhas	1 em 8	8
Alta	1 em 20	7
Moderadamente alta	1 em 80	6
Moderadamente alta	1 em 400	5
Relativamente baixa	1 em 2000	4
Baixa	1 em 15000	3
Remota	1 em 150000	2
Quase impossível	1 em 1500000	1

Figura 9 - Critério de análise e sistema de ranqueamento para a ocorrência da falha

Fonte: Leal, Pinho e Almeida (2005)

Chang, Liu e Wei (2001) definem um outro critério de referência para a pontuação da ocorrência com algumas variações nas probabilidades de ocorrência das falhas. A Figura 10 apresenta o critério de tais autores.

Critério	Pontuação	Razão da possibilidade de ocorrência da falha
Chance remota de falha	1	0
Baixa razão de falha	2	1/20000
	3	1/10000
Moderada razão de falha	4	1/2000
	5	1/1000
	6	1/200
Alta razão de falha	7	1/100
	8	1/20
Muito alta razão de falha	9	1/10
	10	1/2

Figura 10 - Pontuação da ocorrência

Adaptado: Chang, Liu e Wei (2001)

Terninko (2003) adota a referência para a pontuação da ocorrência conforme apresentado na Figura 11.

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

Figura 11 - Pontuação da ocorrência

Adaptado: Terninko (2003)

Na proposta de FMEA tratada por Matos (2004), onde os valores variam de um a cinco, a referência de pontuação da ocorrência é dada conforme apresentado na Figura 12.

Índice	Critérios para as estimativas do índice de ocorrência
1	Probabilidade muito remota de acontecer
2	Número de ocorrências baixo
3	Número de ocorrências moderado
4	Número de ocorrências alto
5	Falhas em proporções alarmantes

Figura 12 - Pontuação da ocorrência

Fonte: Matos (2004)

Vale salientar que, assim como no caso da severidade, estas divergências de referenciais não implicam em uma queda da eficiência da pontuação da ocorrência, porém é fundamental que a equipe, ao definir o critério de pontuação a ser adotado para a ocorrência, não troque de critério ao longo da realização do FMEA. A Figura 13 apresenta seqüência de atividades desta segunda etapa do FMEA.

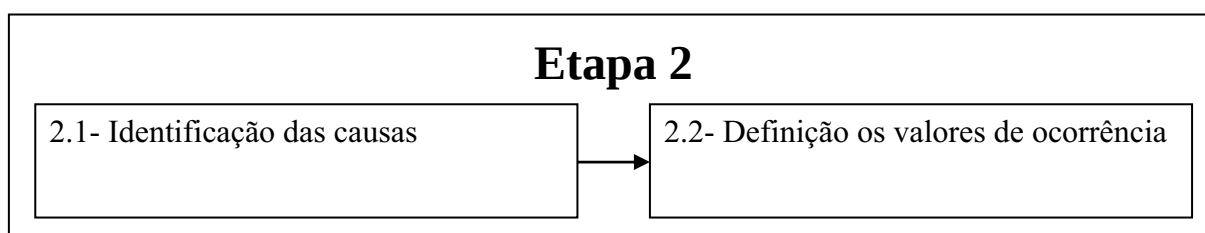


Figura 13 - Seqüência de atividades da segunda etapa do FMEA

Existem alguns cuidados a serem tomados nesta segunda fase. Teng *et al.* (2006) afirmam que alguns problemas associados com a definição das causas em formulários de FMEA podem ser incerteza e imprecisão na sua descrição. Embora este tipo de falha na descrição não venha a violar qualquer regra do FMEA, não provê detalhes úteis para ação corretiva. Na visão desses autores, uma das razões para gerar formulários de FMEA é procurar melhor prática e obter um bom processo que possa ser usado como um padrão para futuros desenvolvimentos, porém com as causas definidas em descrições gerais, os FMEAs geralmente causam confusão entre os participantes envolvidos, o que gera uma deficiência na definição do controle preventivo. Outro problema verificado com o processo de identificação da causa é o fato desta não estar relacionada com o modo de falha identificado anteriormente.

2.8 ETAPA 3

Identificadas as causas, são identificados os atuais meios de prevenção, características do sistema, produto ou processo, que reduzem a probabilidade de ocorrência desta falha (FERNANDES, 2005). Esta terceira etapa de execução do FMEA consiste no preenchimento das duas colunas de controle, a de controle preventivo e a de controle detectivo, além do preenchimento dos valores da coluna de detecção.

Os controles atuais de processo consistem nas descrições dos controles que podem detectar ou prevenir a ocorrência do modo de falha ou a causa da falha, sendo que o controle preventivo atua na causa do modo de falha reduzindo a ocorrência, e o controle de detecção tem a função de detectar o modo de falha antes que este possa atingir a etapa subsequente do processo. A abordagem preferencial é utilizar os controles de prevenção (MARCONCIN, 2004). No formulário do FMEA proposto pelo Instituto da Qualidade Automotiva (2001), têm-se duas colunas para o controle do processo, o que auxilia a equipe a distinguir claramente entre os dois tipos de controle, permitindo uma rápida visualização de que ambos os tipos estão sendo utilizados.

A coluna de detecção define uma classificação associada ao controle de detecção feita por uma pontuação que varia de um a dez, sendo nota um para o maior poder de detecção e nota dez para o menor poder de detecção (TOZZI, 2004). Assim, para a obtenção de um índice menor, o planejamento da detecção precisa ser melhorado. Para a detecção também existem alguns fatores de referência para a pontuação. A Figura 14 apresenta o critério para a análise e pontuação da detecção adotada por Leal, Pinho e Almeida (2005).

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

Figura 14 - Critério de análise e sistema de ranqueamento para a detecção

Fonte: Leal, Pinho e Almeida (2005)

O critério para a pontuação da detecção tratado por Chang, Liu e Wei (2001) é apresentado na Figura 15.

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

Figura 15 - Pontuação da detecção

Adaptado: Chang, Liu e Wei (2001)

Terninko (2003) adota a referência para a pontuação da detecção conforme apresentado na Figura 16.

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

Figura 16 - Pontuação da detecção

Adaptado: Terninko (2003)

Na proposta de pontuação do FMEA com valores de um a cinco, tratada por Matos (2004), a referência de pontuação da detecção é dada conforme apresentado na Figura 17.

Índice	Critérios para as estimativas do índice de não detecção
1	Probabilidade muito alta que a falha seja detectada
2	Probabilidade alta de que a falha seja detectada
3	Probabilidade média de que a falha seja detectada
4	Probabilidade baixa de que a falha seja detectada
5	Probabilidade muito baixa que a falha seja detectada

Figura 17 - Pontuação da detecção

Fonte: Matos (2004)

Assim como no caso da severidade e da ocorrência, as diferentes referências não implicam numa queda da eficiência da pontuação da detecção, porém é crucial que a equipe multifuncional, ao definir o critério de pontuação da detecção a ser adotado, não troque de critério ao longo da realização do FMEA. A Figura 18 apresenta sequência de atividades desta terceira etapa associada ao preenchimento do formulário do FMEA.

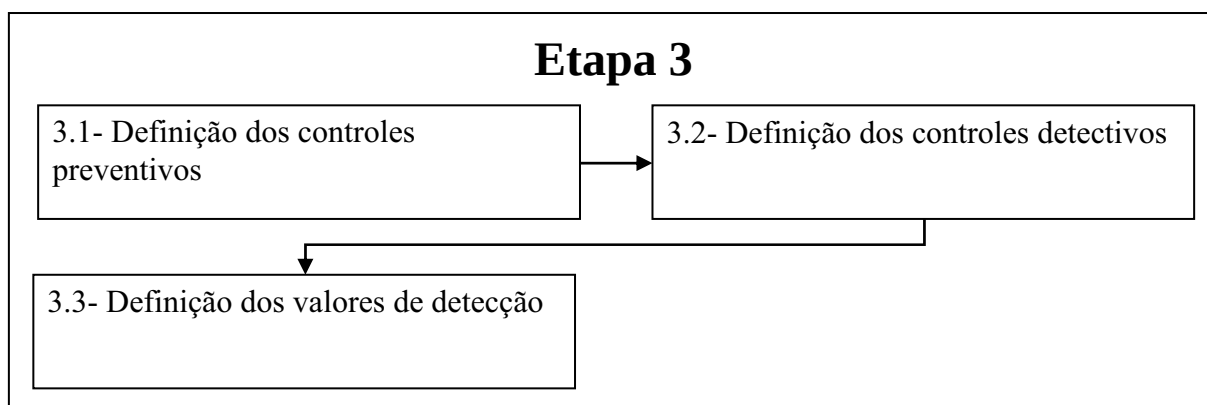


Figura 18 - Seqüência de atividades da etapa 3 do FMEA

Como pontos importantes desta terceira etapa do FMEA, vale destacar que os meios de prevenção atuam diretamente nas causas, de maneira preventiva procurando evitá-las ou de maneira detectiva buscando a detecção das mesmas antes que estas se transformem em modos de falha. Puente *et al.* (2002) reforçam esta idéia afirmando que os controles preventivos existem para detectar ou prevenir cada causa raiz potencial de um determinado modo de falha. Os controles de detecção precisam estar fielmente ligados ao plano de controle existente para o processo, e sua função é detectar a falha antes que esta evolua no processo de modo a atingir as próximas operações ou até mesmo o cliente final.

Marconcin (2004) ainda relata que após a identificação dos controles, deve-se analisar criticamente todos os conceitos de prevenção visando determinar se algum índice de ocorrência precisa ser reavaliado.

2.9 ETAPA 4

Esta quarta e última etapa do FMEA aborda o preenchimento da coluna do número de prioridade de risco (NPR) bem como as colunas relativas às ações recomendadas. Conforme afirmado por Fernandes (2005), o potencial de risco em cada modo de falha está associado ao seu impacto ao cliente, ou seja, severidade, a sua probabilidade de ocorrência e a probabilidade da sua detecção.

Andrade e Turrioni (2000) definem o risco como a avaliação de um perigo associado à probabilidade de ocorrência de um evento indesejável e a gravidade de suas conseqüências. O número de prioridade de risco é obtido pelo produto entre os

índices de severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D) e registrado na coluna NPR. Marconcin (2004) destaca que, dentro do escopo do FMEA, este valor é utilizado para priorizar as deficiências do processo. Tozzi (2004) ainda afirma que, para a escala padrão de um a dez de pontuação da severidade, da ocorrência e da detecção, o valor do NPR pode variar de um a dez mil, e a equipe deve concentrar seus esforços onde o risco é maior.

Desta forma, são tomadas ações corretivas e preventivas direcionadas pelo alto NPR e na maioria dos casos são aplicadas para reduzir a probabilidade de ocorrência e índice de detecção. Estas ações são registradas na coluna ações recomendadas. Cada ação tem que ter uma pessoa responsável por sua execução e com prazo estipulado. O registro é efetuado na coluna responsável e data.

Após a tomada da ação, uma breve descrição da ação realizada e data de efetivação deve ser registrada na coluna ação tomada. Já nas colunas resultados da ação, são registradas as novas pontuações resultantes da implementação das ações, onde todos os índices devem ser analisados criticamente gerando um novo NPR resultante através de uma estimativa futura para novos valores de ocorrência e detecção. A Figura 19 apresenta a seqüência de atividades desta quarta e última etapa do FMEA.

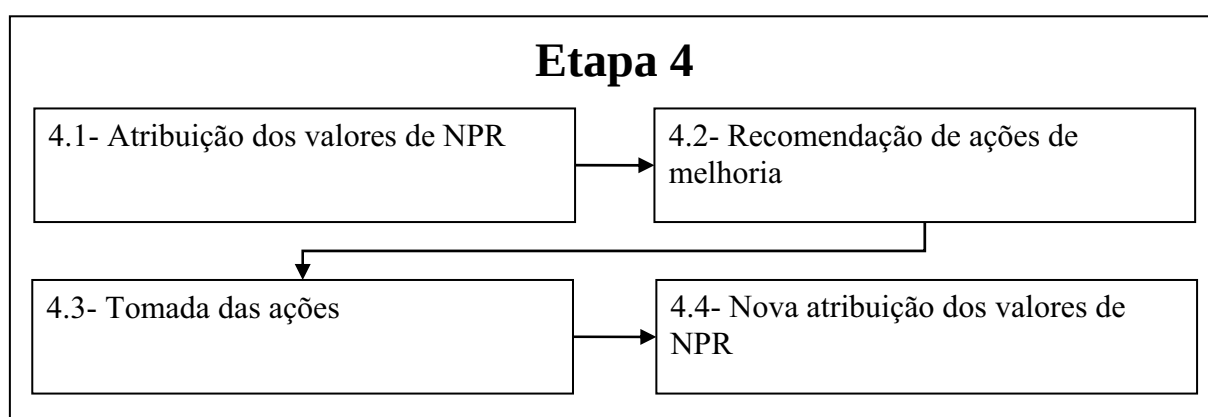


Figura 19 - Seqüência de atividades da etapa 4 do FMEA.

Fernandes (2005) comenta que um risco considerado baixo pelo seu valor de NPR, pode ter um alto valor de ocorrência, uma baixa probabilidade de ser detectado (alto valor de detecção), porém um impacto não significativo ao cliente com uma baixa nota atribuída à severidade. Ou, em outra situação, um risco baixo pelo valor de NPR

pode estar associado a um impacto significativo ao cliente alta pontuação de severidade, porém, com ocorrência muito improvável ou alta capacidade de ser detectado antes que o efeito seja percebido pelo cliente. Um risco é considerado alto quando tiver um impacto significativo no cliente, uma ocorrência provável e baixa capacidade de ser detectado antes de seu efeito ser percebido pelo cliente, o que gera um alto valor de NPR pela multiplicação dos altos valores de severidade, ocorrência e detecção.

Teng *et al.* (2006) destacam um problema nos FMEAs observados em uma determinada cadeia produtiva como sendo a falta de integridade nas informações, que incluem pontuações incompatíveis de severidade, ocorrência, e detecção, com nenhuma ação recomendada para alta prioridade de risco. Tais autores comentam que este problema gera frequentemente uma quantia significativa de complicações nas aplicações do FMEA que resultam numa queda de sua eficiência.

Segundo Fernandes e Rebelato (2006), as ações recomendadas são medidas definidas para a redução do risco de cada modo de falha, e isto é conseguido por ações que aumentem a probabilidade de detecção ou reduzam a ocorrência da falha, sendo que a severidade é um índice que não pode ser reduzido ou eliminado, pois depende apenas do nível de transtorno que o efeito da falha trás ao cliente.

Marconcin (2004) comenta que em todos os casos onde o efeito de um modo de falha potencial identificado puder ser perigoso para o usuário final, ações preventivas e corretivas devem ser consideradas para evitar a falha, eliminando, aliviando ou controlando a causa, sendo que o objetivo das ações recomendadas é reduzir os riscos e aumentar a satisfação do cliente. Este mesmo autor ainda destaca que somente revisões no projeto podem trazer reduções no índice de severidade. Reduções no índice de ocorrência podem ser obtidas removendo-se ou controlando-se uma ou mais causas do modo de falha. O aumento nas ações de contenção resultará em reduções no índice de detecção.

2.10 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PREENCHIMENTO DO FORMULÁRIO DO FMEA

Segundo Fernandes (2005), após a execução inicial, um FMEA deve se tornar não somente um documento do sistema da qualidade, mas sim uma ferramenta que deve ser utilizada no dia a dia. A revisão contínua da tabela do FMEA é um ponto chave do processo, pois existem constantes alterações nas condições de um sistema, produto, processo ou serviço que alteram o FMEA.

Leal, Pinho e Almeida (2005) destacam que não há uma regra algébrica precisa que determine uma pontuação para o índice de ocorrência e detecção, como uma pontuação tradicional baseada em probabilidade de ocorrência e não detecção. Outro problema apontado é o cálculo do produto de três fatores, onde o fator detecção, por exemplo, apresenta uma pontuação que segue uma escala linear, o que não ocorre com o fator ocorrência.

Palady (1997) relata que há duas abordagens distintas para quantificar e classificar cada uma das três categorias (Severidade, Ocorrência e Detecção). Uma abordagem é avaliar a ocorrência de cada causa que contribui para o modo de falha. A outra é avaliar a ocorrência do modo de falha. Independente da abordagem adotada pela equipe, as conclusões devem ser as mesmas. Uma vez definida a abordagem, ela deve ser aplicada no FMEA do início ao fim.

Fernandes e Rebelato (2006), afirmam que com base nos fatores severidade, ocorrência e detecção, o FMEA leva à priorização de quais modos de falha acarretam os maiores riscos ao cliente e que, portanto, merecem atenção. Tais autores destacam que os critérios para a avaliação destes três fatores são definidos de modos distintos entre algumas fontes por estes pesquisadas. Para a avaliação da severidade, parece haver concordância de que esta deva ser realizada a partir do efeito da falha. Porém, para avaliação da ocorrência e detecção, não se observa o mesmo consenso entre as fontes. A Figura 20 apresenta as diferentes tratativas das diferentes fontes pesquisadas por Fernandes e Rebelato (2006).

Fonte	Severidade	Ocorrência	Deteção
ECSS-Q-30-02 A (2001)	Efeito	Modo de Falha	Modo de Falha
Helman e Andrey (1995)	Efeito	Causa	Modo de Falha / Efeito
Layzell e Ledbetter (1998)	Efeito	Modo de Falha	Causa
MIL-STD-1629 A (1980)	Efeito	Modo de Falha	Modo de Falha
Palady (1997)	Efeito	Modo de Falha / Causa	Modo de Falha / Causa
IQA (1998)	Efeito	Causa	Modo de Falha / Causa

Figura 20 - Diferentes pontos de vista para avaliação da severidade, ocorrência e detecção

Adaptado: Fernandes e Rebelato (2006)

Devido à maior abrangência da proposta apresentada por Palady (1997), esta será adotada como referência para a avaliação dos FMEAs neste estudo. Nesta proposta, a ocorrência é determinada tanto a partir do modo de falha quanto a partir da causa, sendo que para os casos onde apenas uma causa for identificada, a referência é o modo de falha, e onde mais de uma causa for identificada, a referência para a pontuação da ocorrência será cada uma das causas. A pontuação da detecção está relacionada com a capacidade dos controles em detectar o modo de falha (controle de detecção), e ainda detectar ou prevenir a causa (controle de prevenção).

Além dos diferentes referenciais de pontuação apresentados na descrição da severidade, ocorrência e detecção; e ainda além das divergências de correlações de fatores apresentados na Figura 20, existem também diferentes tabelas de FMEA conforme destacado por Marconcini (2004), que em seu estudo, relata a existência de formulários com diferenças sutis para a aplicação do FMEA, entretanto, o conceito se mantém independente do modelo escolhido.

3 METODOLOGIA DE AUXÍLIO À DECISÃO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A metodologia de auxílio à decisão é o estudo de diferentes métodos que possibilitam uma melhor análise de critérios, variáveis e fatores para tomada de decisão nas organizações e que envolvam análise de diferentes alternativas, com o objetivo de se escolher aquela que melhor se adequará aos requisitos propostos.

Segundo Schmitd (1995), o processo de tomada de decisão tem característica subjetiva, na qual o decisor toma decisões por meio da percepção e do julgamento sob o seu ponto de vista. A atividade de se tomar decisões é uma tarefa que requer conhecimento, segurança e coerência. A partir de 1970, uma nova fase do processo de apoio à decisão começou a tomar forma nas organizações. A escassez dos recursos financeiros, humanos, etc, e o custo crescente destes recursos fizeram com que os interesses se voltassem para os domínios dos múltiplos critérios.

3.2 DECISÕES COM MÚLTIPLOS CRITÉRIOS

Os métodos de múltiplos critérios de apoio à decisão caracterizam-se principalmente pela capacidade de analisar problemas incorporando critérios, tanto quantitativos como qualitativos, e que, muitas vezes são conflitantes entre si. Partem do princípio que, para a tomada de decisão, a experiência e o conhecimento são pelo menos tão valiosos quanto os dados utilizados.

Nunes Junior (2006) declara que os processos com múltiplos critérios de tomada de decisão surgiram a partir do reconhecimento de necessidades geradas por problemas complexos, onde é preciso analisar critérios pessoais de preferência, com aspectos políticos, risco, beleza e custo, por exemplo. A utilização destes critérios é necessária para a compreensão da realidade do problema analisado e escolha da alternativa que permitirá tomar a decisão mais adequada.

Conforme definido por Braglia, Carmignani e Frosolini (2006) as decisões de múltiplos critérios são adotadas para resolver problemas decisórios com atributos

múltiplos que conflitam entre si, com unidades de medida heterogêneas (uma unidade de um atributo não pode ser comparada diretamente com a unidade de um outro), ou ainda em casos onde a melhor alternativa precisa ser selecionada dentre uma série de diferentes alternativas apresentadas.

Forman e Selly (2001) relatam que no final dos anos 60, o matemático Thomas L. Saaty foi um dos pioneiros da Pesquisa Operacional (PO). Devido às dificuldades de comunicação entre cientistas e advogados e a falta de uma abordagem sistemática prática para priorizar cenários e tomadas de decisão, Saaty foi motivado a desenvolver um meio simples para ajudar pessoas que necessitaram tomar decisões complexas. O resultado foi o início do desenvolvimento de um método de apoio à tomada de decisão com múltiplos critérios, que culminou com o lançamento em 1977 do artigo *A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures* (Método da Escala para Prioridades em Estruturas Hierárquicas), o que veio a ser chamado em 1980 de *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

Saaty (2001) afirma que o AHP é um método de escolha da melhor alternativa de decisão considerando múltiplos critérios expressos por meio de valores qualitativos ou quantitativos. Segundo Schmitd (1995), o método AHP caracteriza-se pela capacidade de analisar o problema de tomada de decisão através da construção de níveis hierárquicos e a comparação par-a-par dos níveis da hierarquia. Montevechi e Pamplona (1996) afirmam que o método AHP pode ser utilizado quando se trata com a opinião do ser humano, sendo importante apresentar como quantificar a opinião de especialistas, fato sempre necessário em decisões de investimento e de negócios, com relativa complexidade de execução e análise.

Em particular, a metodologia de AHP representa uma das aproximações mais promissoras que a decisão de múltiplos critérios faz de problemas decisórios (BRAGLIA, CARMIGNAMI e CALARGE, 2006). Kinoshita, Skitani e Shi (2001) destacam que, no método AHP, o decisor identifica um problema de avaliação em uma estrutura hierárquica formada por uma meta de avaliação, com critérios e alternativas cada um dos quais correspondendo a um nó hierárquico.

Ben (2006) afirma que o AHP é um método de avaliação hierárquica de atributos com aplicações diversas em áreas das ciências sociais, principalmente por possibilitar

que análises qualitativas e subjetivas sejam operacionalizadas através de características numéricas. No caso específico de análises ambientais, o AHP permite a hierarquização das opiniões subjetivas sobre categorias de direcionadores de valor, permitindo um tratamento quantitativo que conduza a uma estimativa numérica da importância relativa de cada um dos direcionadores.

Segundo Wang, Chu e Wu (2007), o AHP é o mais popular método de decisão em múltiplos critérios, e possui a vantagem de ser o único modelo conhecido que permite a medição da coerência dos julgamentos das decisões. Forman e Selly (2001) argumentam que o nome do método AHP explica um pouco de sua lógica de aplicação:

- a) *Analytic*: Pelas suas características, o AHP realmente deveria ser chamado de Processo da Síntese Hierárquica porque na sua essência, o AHP auxilia na medição e sintetização de uma série de fatores envolvidos em decisões complexas.
- b) *Hierarchy*: Subdivisão em hierarquia é uma característica que não é estranha às organizações humanas. Hierarquia é a forma adaptável para inteligência finita assumir uma face complexa. Grandes organizações são quase universalmente hierárquicas em estrutura, pois são divididas em unidades que são subdivididas em unidades menores e assim por diante.
- c) *Process*: Um processo é uma série de ações, mudanças, ou funções que nos levam a um fim ou resultado. O processo do AHP não é um modelo que acha a resposta certa, mas um processo que ajuda tomadores de decisão a achar a melhor resposta.

Conforme afirma Bayazit (2005), o processo de hierarquia analítica (AHP) é uma técnica usada para determinar a importância relativa de um conjunto de atributos ou critérios, tendo sido desenvolvida para resolver os mais complexos problemas de múltiplos critérios. Segundo Ohfui et al.¹ (1997 *apud* Carnevalli, Mura e Calarge,

¹ OHFUJI, T. et al. (1997) - **Métodos de desdobramento da qualidade (1)**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni *apud* CARNEVALLI, J. A.; MIGUEL, P. A. C.; CALARGE, F. A., **Análise de dados da literatura sobre a implantação de QFD utilizando o método AHP**, XI SIMPEP, Bauru, SP 2004;

2004, p.3) o método AHP pode ser aplicado segundo o procedimento abaixo seqüenciado:

- a) Montar o formulário do método AHP (na realidade este formulário é uma matriz formada por duas tabelas idênticas);
- b) Fazer a comparação de cada item em par, fixando o item da linha e comparando-o com os itens de cada coluna. Para isto, são utilizados os valores comparativos de 1/9 a 9 onde 1- igual importância; 3- pouco mais importante; 5- o item da linha é importante em comparação com o item da coluna; 7- mais importante; 9- muito mais importante; 2, 4, 6 e 8 são números intermediários e os valores 1/2 a 1/9 são usados quando o item da coluna tem um valor superior a 1 em relação ao item fixado na linha;
- c) Repetir o procedimento para cada linha, e calcular a média geométrica de cada linha;
- d) Fazer a somatória da coluna da média geométrica e calcular o peso em porcentagem de cada linha dividindo-se o valor da média geométrica com o valor da somatória.

Conforme relatado por Morita (2001) a estruturação de um problema AHP começa na definição de um objetivo global desejado. Baseado no objetivo principal, definem-se os objetivos secundários ou critérios numa estrutura de árvore, em que o objetivo global é a raiz. Shmidt (1995) propõe um fluxograma de aplicação do AHP conforme é apresentado na Figura 21.

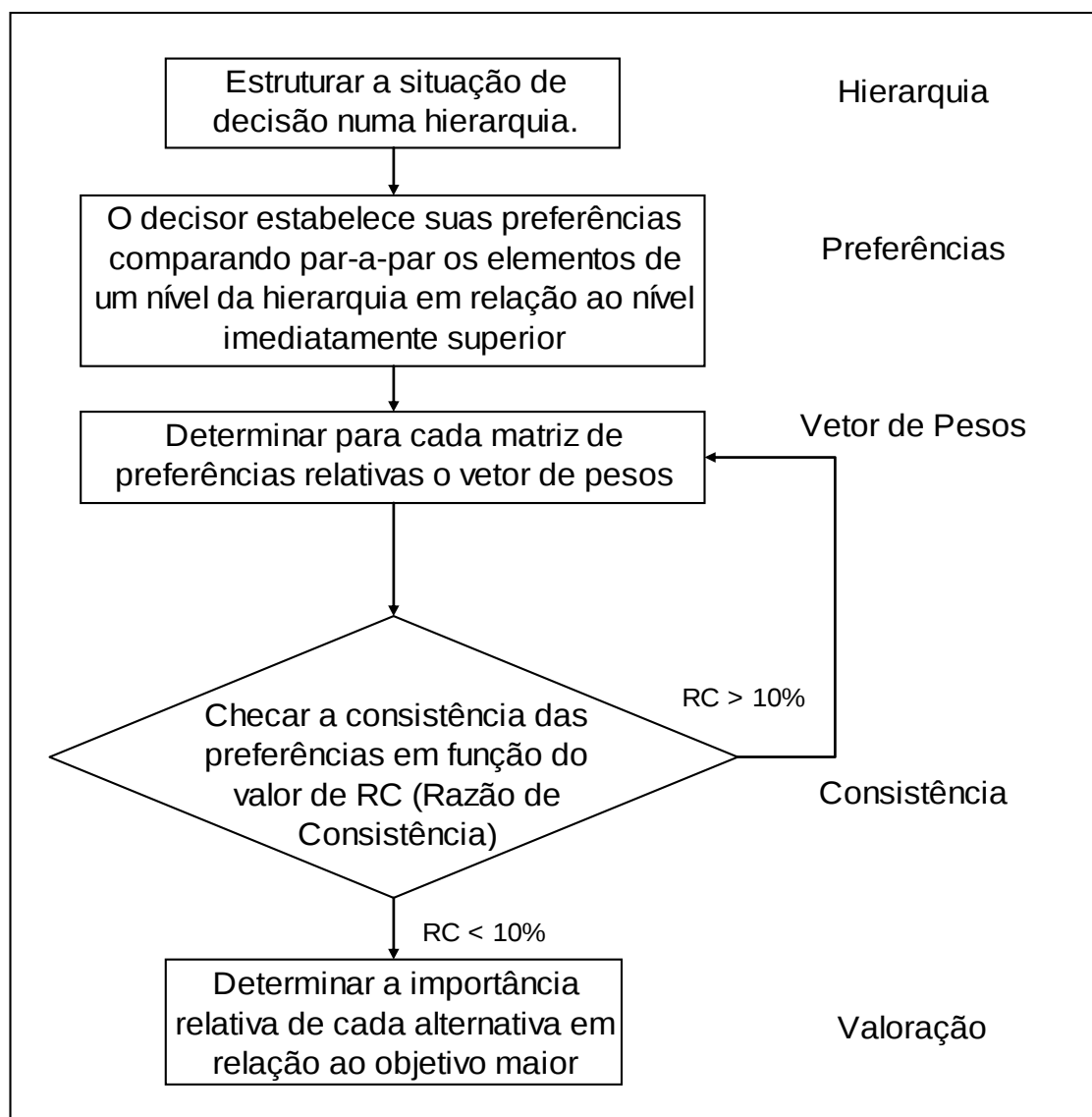


Figura 21 - Fluxograma geral do AHP

Fonte: Schmidt (1995)

O modelo proposto por Nunes Junior (2006) aborda uma fase pré-estruturação nomeada como definição dos valores do tomador de decisão e definição do problema da decisão. Segundo o autor, esta fase é importante para identificar corretamente o problema da decisão, já que é fundamental conhecer os valores do tomador de decisão, ou seja, o que é importante para ele, sem o qual, pode-se identificar o problema errado, chegando a uma solução errada para o problema de decisão estudado. As etapas apresentadas no fluxograma proposto por Schmidt (1995) são abordadas no roteiro abaixo apresentado por Nunes Junior (2006):

A etapa definida como Hierarquia no fluxograma da Figura 21 é tratada como sendo a decomposição do problema, o que consiste em pesquisar, dividir e estruturar o

problema formando uma hierarquia. A hierarquia forma uma estrutura que permite visualizar o problema em termos de objetivo e critérios, conforme ilustrado na Figura 22. Segundo Schmidt (1995), a estrutura hierárquica do AHP é usada para representar simplesmente o tipo de dependência de um nível ou componente de um sistema com outro de maneira seqüencial. É também uma maneira conveniente de decompor um problema complexo numa pesquisa de explicações de causa-efeito, em passos os quais formam uma cadeia linear.

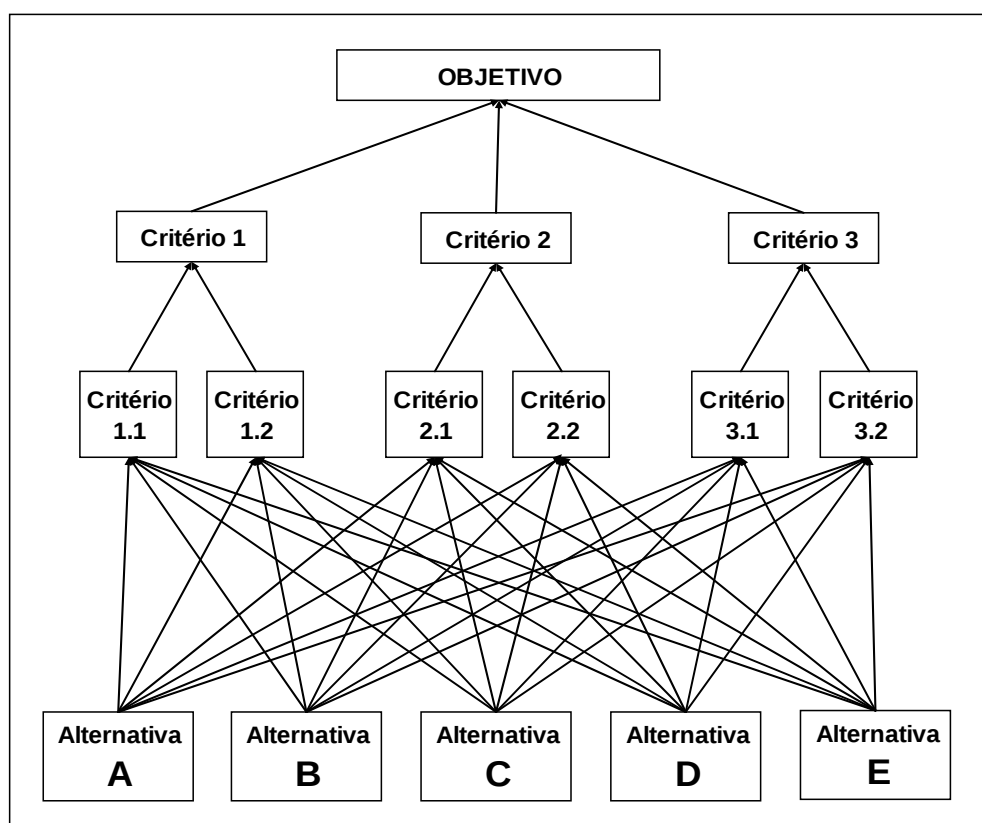


Figura 22 - Exemplo de estrutura hierárquica do AHP

Fonte: Nunes Júnior (2006)

A etapa definida como Preferências consiste em estabelecer prioridades entre os critérios, que são dadas por comparação dois a dois em relação a sua contribuição ao critério imediatamente acima, sempre dentro do contexto do objetivo estabelecido para o problema. Segundo Nunes Junior (2006), este processo pode ser realizado através de uma entrevista sobre o problema de decisão, e os julgamentos são extraídos do tomador de decisão, conforme Figura 23, colocados dois a dois como pesos em uma balança. Este processo garante que os critérios estão priorizados no contexto do objetivo a ser atingido.

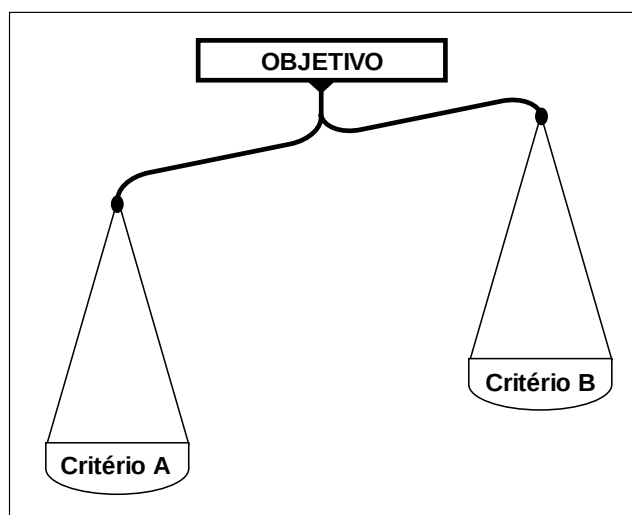


Figura 23 - Definição das prioridades da hierarquia do AHP

Fonte: Nunes Júnior (2006)

A etapa definida como Vetor de Pesos consiste numa síntese obtida através de um processo de avaliação e combinação de prioridades aplicadas ao problema. A prioridade total é obtida através das ligações do modelo. A prioridade total de cada alternativa é somada para o resultado total ou síntese das preferências do tomador de decisão. A Figura 24 ilustra o que ocorre com os julgamentos do tomador de decisão, distribuídos ao longo da estrutura hierárquica até os níveis mais inferiores dos critérios, e com isto, quando as alternativas são julgadas, os pesos são repassados pelos nós da hierarquia e as alternativas recebem a síntese das preferências do tomador de decisão.

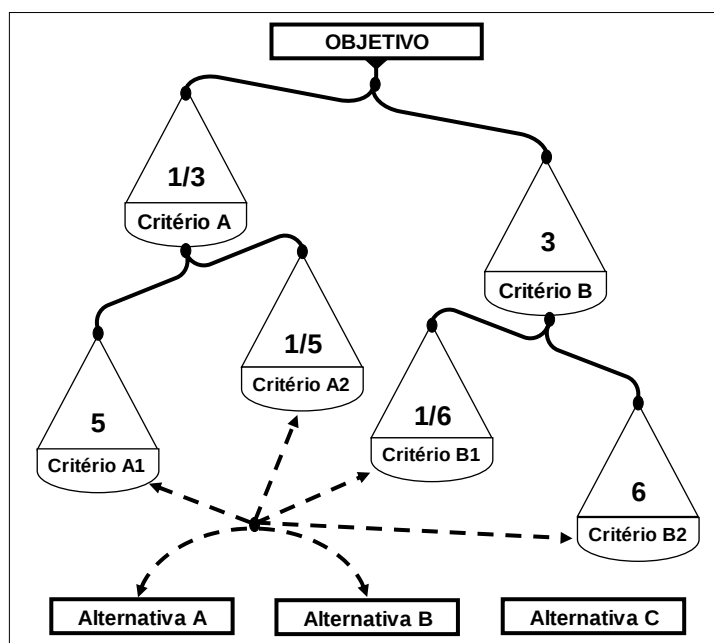


Figura 24 - Síntese das preferências do tomador de decisão AHP

Fonte: Nunes Júnior (2006)

A última etapa do fluxograma é definida como Valoração. Nunes Junior (2006) trata esta fase como sendo um processo de interação, onde as etapas anteriores são repetidas várias vezes. Como informações foram incorporadas ao processo através de cada etapa, é benéfico que cada etapa seja revista com esta nova visão. Interações permitem que a decisão seja revisada com um entendimento melhor do problema através do modelo desenvolvido. Nos casos em que se tem mais de um tomador de decisão, estes podem ser incluídos no modelo hierárquico, para obter o consenso do grupo sobre a decisão a ser tomada.

Salomon (2004) apresenta um estudo onde, a partir de uma suposta necessidade de compra de uma determinada quantidade ou lote de um produto, se aplica o método AHP para a escolha da melhor alternativa. A decisão, neste caso, se trata da seleção, de qual fornecedor o lote deve ser comprado. Para este produto existem três fornecedores conhecidos:

Fornecedor A que apresenta um preço baixo e produtos com um nível de qualidade aceitável. Mas, demora na entrega. Ou seja, pede um prazo maior que o desejável.

Fornecedor B, sempre entrega produtos de melhor qualidade e num menor prazo que o Fornecedor A. Mas, cobra mais caro por isso.

Existe ainda uma terceira alternativa, o Fornecedor C, que apresenta um desempenho intermediário em termos de preço e qualidade do produto. No entanto, este terceiro fornecedor, com frequência, entrega após o prazo prometido.

O desempenho dos fornecedores pode ser resumido conforme apresentado na Figura 25. Observa-se que não existe dominância entre as alternativas: não há um fornecedor com desempenho igual ou superior ao de outro, nos três atributos, simultaneamente. Assim, a seleção de qualquer um dos três fornecedores deve ser considerada como solução alternativa para o problema de decisão.

FORNECEDOR	Preço	Qualidade do produto	Entrega
A	Bom	Aceitável	Demora
B	Alto	Muito boa	Rápida
C	Médio	Boa	Atrasa

Figura 25 - Desempenho dos três fornecedores do mesmo item

Fonte: Salomon (2004)

A estruturação do problema segue com a definição da estrutura hierárquica. Salomon (2004) define que nas estruturas hierárquicas, o objetivo da decisão é colocado no primeiro nível hierárquico. No segundo nível estão os critérios de decisão e no último nível estão as alternativas. A Figura 26 apresenta a estrutura hierárquica para este exemplo, onde no primeiro nível está o objetivo que é selecionar um fornecedor, no segundo nível estão os critérios representados por seus atributos: Preço (atributo do critério econômico), Qualidade do Produto (critério técnico) e Entrega (critério logístico); no último nível hierárquico estão as alternativas, ou seja, os três fornecedores.

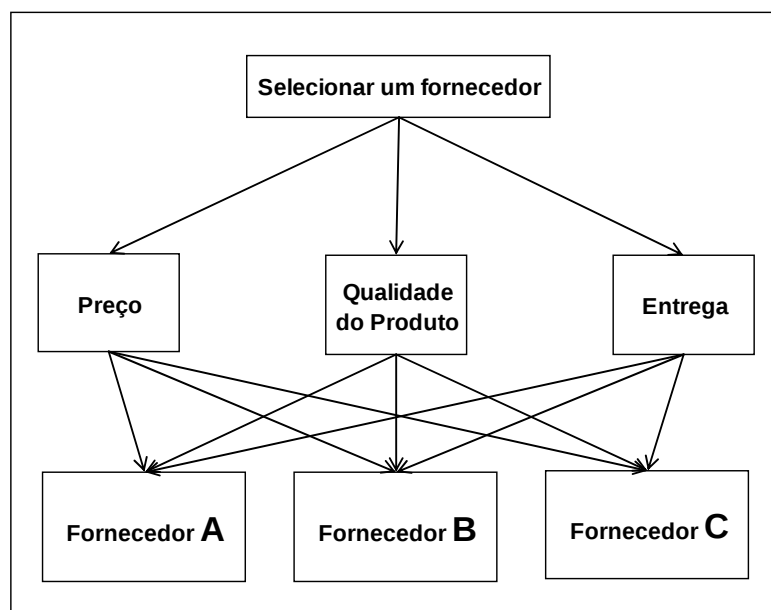


Figura 26 - Estrutura hierárquica para o exemplo de seleção de fornecedores

Fonte: Salomon (2004)

Com o problema já estruturado, o próximo passo é fazer a atribuição dos pesos, que são os valores de importância para os critérios e também os valores de desempenho para cada alternativa de acordo com cada critério. Conforme definido por Salomon (2004) no método AHP são utilizadas matrizes de julgamentos para se realizar a atribuição dos pesos em ambos os casos.

Conforme relatado por Nunes Junior (2006) quando se estabelece as prioridades na hierarquia, é possível definir seus valores através de comparações dois a dois dos critérios quanto a sua importância para o critério ou objetivo imediatamente acima. Tal comparação é realizada a partir da Escala Fundamental de Saaty, critério apresentado na Figura 27, que define e explica o conceito dos pesos utilizados no AHP.

Valor	Definição	Explicação
1	Igual importância entre os elementos i e j	Dois elementos contribuem igualmente para o objetivo ou critério
3	Fraca importância de um elemento sobre o outro	A experiência ou o julgamento é levemente a favor de um elemento sobre o outro
5	Forte importância	O julgamento é fortemente a favor de um elemento
7	Importância muito forte ou importância demonstrada	Um elemento é fortemente favorecido e sua dominância pode ser demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência a favor de um elemento sobre o outro é da maior ordem de afirmação
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes	Quando se necessita de comprometimento ou coerência entre os julgamentos
Recíprocos dos números acima	Se um elemento i recebe um dos valores não nulos acima quando comparado com o elemento j , então j receberá o valor recíproco quando comparado com i	
Números racionais	Valores fora da escala	Para forçar a coerência

Figura 27 - Escala de valores para a comparação paritária no método AHP

Conforme descrito por Vargas (1990) o tomador de decisão deve ser capaz de fazer comparações e declarar a força de suas preferências. Dado um critério e duas alternativas, A e B, é preciso definir qual alternativa é mais satisfatória ao critério e qual o tamanho da preferência, de modo que a intensidade destas preferências deve satisfazer a condição recíproca, se uma vez definido que A é X vezes mais preferido que B, então B é $1/X$ vezes da preferência de A. A Tabela 1 apresenta uma matriz de julgamentos da importância relativa dos critérios. Observa-se que os critérios são representados nos julgamentos por seus respectivos atributos. Ou seja, os julgamentos são realizados entre os atributos. O atributo qualidade do produto foi julgado como sendo mais importante que os outros dois atributos: “fracamente mais importante” do que o Preço e “fortemente mais importante” do que a entrega.

Tabela 1 - Julgamento e importância dos atributos

Atributo	P	Q	E
P (Preço)	1	1/3	3
Q (Qualidade do Produto)	3	1	5
E (Entrega)	1/3	1/5	1
TOTAIS	4,330	1,530	9,000

Fonte: Salomon (2004)

Shimizu (2001) afirma que para obter a prioridade relativa de cada critério é normalizar os valores da matriz dividindo cada elemento pela soma da coluna a que pertence, por exemplo, para o critério preço, têm-se:

$$1 \div 4,33 = 0,231; (1/3) \div 1,53 = 0,217; 3 \div 9 = 0,333$$

A prioridade de cada critério é a média aritmética dos valores da linha da matriz normalizada. No caso do critério preço, esta prioridade é igual a:

$$(0,231 + 0,217 + 0,333) \div 3 = 0,260$$

A prioridade relativa é tida como a importância de cada atributo. A Tabela 2 apresenta a definição das prioridades relativas dos três critérios do exemplo.

Tabela 2 - Prioridade relativa para os atributos Preço, Qualidade do Produto e Entrega

Atributo	P	Q	E	Prioridade Relativa
P (Preço)	0,231	0,217	0,333	0,260
Q (Qualidade do Produto)	0,692	0,652	0,556	0,633
E (Entrega)	0,077	0,130	0,111	0,106
TOTAIS	1,000	1,000	1,000	1,000

Fonte: Salomon (2004)

A quarta etapa do fluxograma de Schmidt (1995) é definida como Consistência, entretanto conforme abordado por Salomon (2004), o termo correto a ser empregado é Coerência. A tradução para a palavra inglesa *Consistency* é coerência, uma vez que no idioma português “coerência” é a “ligação ou nexos entre os fatos” e “consistência” é o

“estado de uma coisa que promete durar ou não ter mudança”. Desta forma, esta etapa trata da análise de sensibilidade, e é executada para avaliar a coerência do resultado nas alternativas, com respeito a cada um dos critérios que os compõe. Esta análise demonstra a fragilidade ou não das preferências expressadas nas alternativas, ao mudar a prioridade de um critério. Ela consiste em fazer “pequenas mudanças” no peso das avaliações dos critérios na estrutura e ver o impacto no resultado. Quando encontra-se um impacto significativo, capaz de modificar o resultado, o critério onde foi detectado tal sensibilidade deve ser submetido a uma análise crítica pelo tomador de decisão para confirmar sua avaliação.

CR (*Consistency Ratio* – Razão de Coerência) é um indicador da coerência dos julgamentos, que considera o afastamento entre λ e n , conforme a Equação 1, e considera também um erro aleatório associado à ordem da matriz de julgamento

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

Salomon (2004) afirma que quando uma matriz de julgamentos apresenta todos julgamentos coerentes entre si, tem-se $\lambda = n$, onde n é a ordem da matriz de julgamentos. *RI* é o índice de coerência aleatória referente a um grande número de comparações paritárias, Shimizu (2001) adota os valores para este índice conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Índice de coerência

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

Fonte: Shimizu (2001)

Shimizu (2001) afirma que para se testar a coerência é preciso primeiramente determinar os pesos, e neste exemplo, o cálculo se dá por meio da seguinte operação:

$$0,260 \times [1 \quad 3 \quad 1/3] + 0,633 \times [1/3 \quad 1 \quad 1/5] + 0,106 \times [3 \quad 5 \quad 1] =$$

$$\begin{bmatrix} 0,260 + 0,211 + 0,318 \\ 0,780 + 0,633 + 0,530 \\ 0,086 + 0,126 + 0,106 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,789 \\ 1,943 \\ 0,318 \end{bmatrix} = [0,789 \quad 1,943 \quad 0,318]^T$$

O vetor de coerência é obtido dividindo cada peso pela respectiva prioridade relativa, ou seja:

$$\text{Vetor de Coerência} = [0,789 \div 0,260 \quad 1,943 \div 0,633 \quad 0,318 \div 0,106]^T$$

$$\text{Vetor de Coerência} = [3,035 \quad 3,069 \quad 3,000]^T$$

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

$$\lambda_{\max} = \frac{(3,035 + 3,069 + 3,000)}{3} = 3,035$$

Assim, aplica-se a Equação 1, onde, para $n = 3$, $RI = 0,58$. Desta forma, têm-se:

$$CR = \frac{\lambda - n}{(n - 1)RI} = \frac{3,035 - 3}{(3 - 1) \times 0,58} = 0,030$$

Saaty (2001) recomenda que, para valores de CR acima de 0,20, os julgamentos sejam revistos. Para o julgamento da Tabela 15 tem-se $CR \cong 0,030$. Assim, o vetor $[26,0\% \quad 63,3\% \quad 10,6\%]$ pode ser adotado como vetor da importância dos atributos Preço, Qualidade do Produto e Entrega, nesta ordem.

Esta mesma comparação paritária pelas matrizes de julgamentos é aplicada para avaliar o desempenho de cada um dos fornecedores, sendo uma matriz de comparação para cada atributo agregado às alternativas de decisão. As Tabelas 4 e 5 apresentam os julgamentos referentes à Qualidade do Produto e Entrega, respectivamente. Estes julgamentos foram realizados conforme a escala de valores para a comparação

paritária no método AHP (Figura 27), sendo que os valores de *CR* obtidos para as matrizes de julgamentos são aproximadamente iguais a 0,062 e 0,028 (SALOMON, 2004). Assim, os vetores apresentados podem ser adotados como vetores do desempenho dos fornecedores nestes dois atributos.

Tabela 4 - Julgamentos e desempenho dos fornecedores com relação à Qualidade do Produto

Fornecedor	A	B	C	Prioridade Agregada
A	1	1/7	1/5	7,2%
B	7	1	3	64,9%
C	5	1/3	1	27,9%

Fonte: Salomon (2004)

Tabela 5 - Julgamentos e desempenho dos fornecedores com relação à Entrega

Fornecedor	A	B	C	Prioridade Agregada
A	1	1/5	3	17,8%
B	5	1	9	75,2%
C	1/3	1/9	1	7,0%

Adaptado: Salomon (2004)

Com relação ao Preço, trata-se de um atributo quantitativo e inverso. A Tabela 7 apresenta uma maneira de se obter valores do desempenho das alternativas para um atributo inverso, com a harmonização dos dados disponíveis para o desempenho.

Tabela 6 - Cálculo do desempenho dos fornecedores com relação ao Preço

Fornecedor	Preço (\$/lote)	Prioridade Agregada	
A	15.000	$52 / 15 = 3,47$	$3,47 / 9,13 = 38,0\%$
B	20.000	$52 / 20 = 2,60$	$2,60 / 9,13 = 28,5\%$
C	17.000	$52 / 17 = 3,06$	$3,06 / 9,13 = 33,5\%$
Soma	52.000	9,13	100%

Adaptado: Salomon (2004)

Estas prioridades formam a matriz de prioridades dos critérios Qualidade do Produto, Entrega e Preço agregadas às alternativas Fornecedores A, B e C. Multiplicando a matriz das prioridades agregadas pelo vetor das prioridades relativas, é possível determinar as prioridades compostas que classificam cada uma das alternativas, formando o vetor de desempenho global.

$$\begin{array}{l} \text{Fornecedor} - A \\ \text{Fornecedor} - B \\ \text{Fornecedor} - C \end{array} \begin{bmatrix} 0,072 & 0,178 & 0,380 \\ 0,649 & 0,752 & 0,285 \\ 0,279 & 0,070 & 0,335 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,260 \\ 0,633 \\ 0,106 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,172 \\ 0,675 \\ 0,154 \end{bmatrix}$$

A aplicação do método AHP indica que a alternativa de maior valor de desempenho global como sendo o Fornecedor B, já que segundo as comparações paritárias fornecidas, é a alternativa que possui maior prioridade composta, com valor de 67,5%.

3.3 CONJUNTOS NEBULOSOS OU *FUZZY SETS*

Conforme afirmado por Moré (2004), a maior parte da linguagem natural contém ambigüidades e multiplicidade de sentidos. Em particular, os adjetivos utilizados para caracterizar objetos ou situações não proporcionam clareza suficiente, sendo ambíguos em termos de amplitude de significados. O mesmo autor cita o exemplo no qual, quando se diz que uma pessoa é alta, não se pode claramente afirmar quem é alto ou quem não é; ou ainda, a ambigüidade de pessoa idosa vem do adjetivo idoso. Os adjetivos são usualmente qualitativos, mas alguns como alto ou idoso são percebidos em conexão com quantidades de altura ou idade. Especialmente em engenharia, adjetivos que descrevem estados ou condições são, quase sempre, relacionados a quantidades. A maioria dos adjetivos são quantificados por meio de uma dimensão de sentidos como altura, idade ou extensão, mas valores abstratos, tais como um pequeno número ou grande número também podem ser dimensionados e quantificados.

Sellitto (2002) define sistemas especialistas como sendo sistemas computacionais que resolvem problemas de forma similar ao modo como um especialista humano os resolveria, possuindo capacidade de decisão em campos específicos do conhecimento.

Conforme tratado por Hennemann (2004), os sistemas especialistas são baseados em questões onde a atividade humana é o raciocínio e não o cálculo exato, onde a habilidade em tomar atitudes corretas, mediante decisões difíceis, está baseada na inferência, julgamentos simbólicos e experiências passadas. O mesmo autor ainda complementa que um sistema especialista é similar a um programa qualquer que realiza decisões sequenciais baseado em etapas pré-programadas e informações

contidas na memória. Entretanto se distingue destes por facilidades embutidas para criação de regras, armazenamento de dados (fatos) e tomadas de decisões lógicas que podem levar em conta efeitos de probabilidade e incerteza.

Moré (2004) afirma que o conceito de conjunto *fuzzy*, foi introduzido em 1965 por L. A. Zadeh que observou que os recursos tecnológicos disponíveis eram incapazes de automatizar as atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química que compreendessem situações ambíguas, não passíveis de processamento através da lógica booleana. Procurando solucionar o problema do tratamento de informações de caráter impreciso ou vago forneceu um ferramental matemático que deu origem aos Sistemas *Fuzzy*. Segundo Campos Filho (2004), o termo *fuzzy* ao ser traduzido da língua inglesa pode ter vários significados conforme o contexto de interesse, todavia, o conceito básico deste adjetivo passa sempre pelo vago, indistinto, incerto. Na área da engenharia, embora ainda não seja uma unanimidade, a tradução para o português mais utilizada é nebuloso e difuso.

Shimizu (2001) afirma que as operações com conjuntos nebulosos (ou *fuzzy sets*) estão sendo cada vez mais utilizadas em sistemas especialistas, a fim de completar, expressar ou operar com maior naturalidade as regras de conhecimento existentes em banco de dados de especialistas. A teoria de conjuntos *fuzzy* tem sido empregada com sucesso para exprimir o conhecimento impreciso e resolver problemas em muitas áreas onde o modelamento convencional é difícil ou ineficiente. A possibilidade de descrição lingüística do modelo, ao invés de equações diferenciais, possibilita o aproveitamento do conhecimento heurístico dos envolvidos e facilita o desenvolvimento de soluções.

Campos Filho (2004) destaca que a diferença fundamental entre a proposição clássica e a *fuzzy* está na faixa de seus valores-verdade, já que enquanto na teoria tradicional dos conjuntos da lógica clássica, um elemento pertence ou não ao conjunto, na teoria dos conjuntos *fuzzy* um elemento do universo de discurso pode ser definido matematicamente por um valor que represente o seu grau de pertinência ao conjunto. Este valor de pertinência pertence a uma faixa de 0 (elemento não pertencente ao conjunto) até 1 (elemento totalmente pertencente ao conjunto). Ou seja, a lógica *fuzzy* é uma forma de gerenciamento de incertezas, através da expressão de termos com grau

de certeza, num intervalo numérico $[0,1]$, onde a certeza absoluta é representada pelo valor 1. Segundo Shimizu (2001), um conjunto, A , é denominado nebuloso se cada elemento $x \in A$ for caracterizado por uma Função de Pertinência, $\mu(x)$, cujo valor indica o grau de pertinência, ou possibilidade de ocorrência, desse elemento no conjunto.

Conforme destacado por Malutta (2004), na lógica *fuzzy*, o valor-verdade de uma proposição pode ser um subconjunto *fuzzy* de qualquer conjunto parcialmente ordenado, ao contrário dos sistemas lógicos binários, onde o valor-verdade só pode assumir dois valores: verdadeiro (1) ou falso (0). Nos sistemas lógicos de múltiplos valores, o valor verdade de uma proposição pode ser um elemento de um conjunto finito, num intervalo, ou uma álgebra booleana. Na lógica nebulosa, os valores-verdade são expressos lingüisticamente (verdade, muito verdade, não verdade, falso, muito falso), e cada termo lingüístico é interpretado como um subconjunto *fuzzy* do intervalo unitário.

Os número *fuzzy* têm sido empregado na maioria dos casos na forma triangular. Existem estudos que aplicam os números *fuzzy* trapezoidais, que segundo Lee, Lin e Gupta (2004), o emprego do número *fuzzy* trapezoidal se dá quando se necessita de maior representatividade em termos de estimações lingüísticas. Tais autores aplicaram os números trapezoidais em um estudo econômico, onde se necessita de maior precisão nas respostas, já que se, por exemplo, um perito freqüentemente indica que o primeiro investimento é provável estar entre 20 a 22 milhões de dólares, mas pode ser tão baixo quanto 18, ou alto como 24. Nesta situação, o primeiro investimento poderia ser denotado por 18, 20, 22 ou 24 milhões, cabendo a aplicação de número *fuzzy* trapezoidal. De fato, um número *fuzzy* triangular é um caso especial de trapezoidal. Quando os dois valores mais promissores são o mesmo número, o número *fuzzy* trapezoidal se torna um número triangular. Conseqüentemente, um número *fuzzy* trapezoidal pode lidar com as mais gerais situações. No presente estudo serão aplicados apenas conjuntos *fuzzy* triangulares.

Para ilustrar esta aplicação deste método é apresentado, na seqüência, um estudo que envolve a medição dos resultados de uma pesquisa de satisfação de clientes. Conforme relatado por Aguiar (2006), tal pesquisa foi realizada com a aplicação de

questionários específicos para a avaliação da satisfação de cinco empresas clientes, tendo três aspectos como foco de concentração: Qualidade; Logística e Comercial. A Figura 28 apresenta os resultados obtidos pela avaliação dos cinco clientes divididos por aspecto. Estes valores serão os dados de entrada na aplicação dos conjuntos *fuzzy* para a avaliação do grau de satisfação de cada um dos clientes consultados.

ASPECTO	Cliente 01	Cliente 02	Cliente 03	Cliente 04	Cliente 05
QUALIDADE	5,60	6,40	7,60	7,20	6,40
LOGÍSTICA	6,40	8,00	6,80	5,20	6,40
COMERCIAL	5,60	6,00	7,20	5,60	5,60

Figura 28 - Resultado da avaliação dos fornecedores

Fonte: Aguiar (2006)

A lógica *fuzzy* assinala diferentes graus de pertinência a conjuntos adjacentes, de acordo com o grau de superação da sua condição. A transição para a pertinência ao conjunto é gradual, podendo uma situação intermediária pertencer aos dois conjuntos, de modo difuso (SELLITTO, 2002). Neste exemplo, para cada um dos três aspectos foram definidos três graus de pertinência relativos à satisfação dos clientes (baixa, média e alta) com uma abordagem auxiliada pelos conceitos de Conjunto Nebuloso Triangular (*TFS, Triangle Fuzzy Sets*). Além disso, foram adotados três diferentes níveis de aceitação para cada um dos aspectos analisados. Para a Qualidade, foi adotado um nível mais rigoroso, para a Logística um nível moderado e para o Comercial um nível menos rigoroso. O gráfico da Figura 29 apresenta os graus de pertinência da satisfação do cliente relativos ao aspecto Qualidade como sendo: Baixa (0;0;7); Média (5;7;9) e Alta (7;10;10).

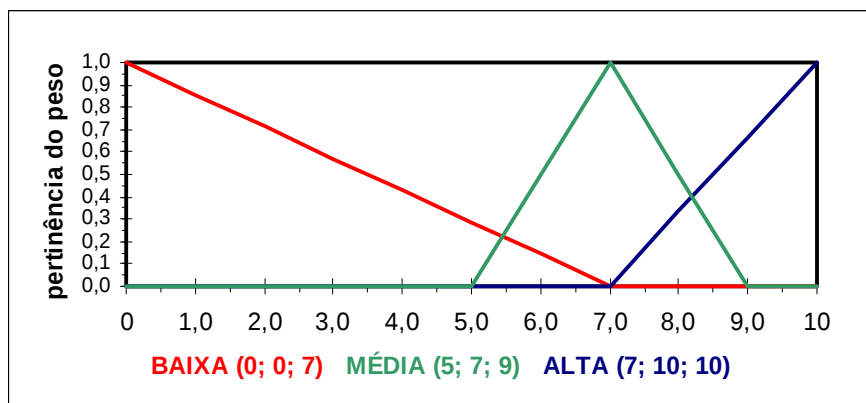


Figura 29 - Gráfico da função de pertinência difusa para o aspecto Qualidade

Fonte: Aguiar (2006)

O gráfico da Figura 30 apresenta os graus de pertinência da satisfação do cliente relativos ao aspecto Logístico como sendo: Baixa (0;0;6); Média (4;6;8) e Alta (6;10;10).

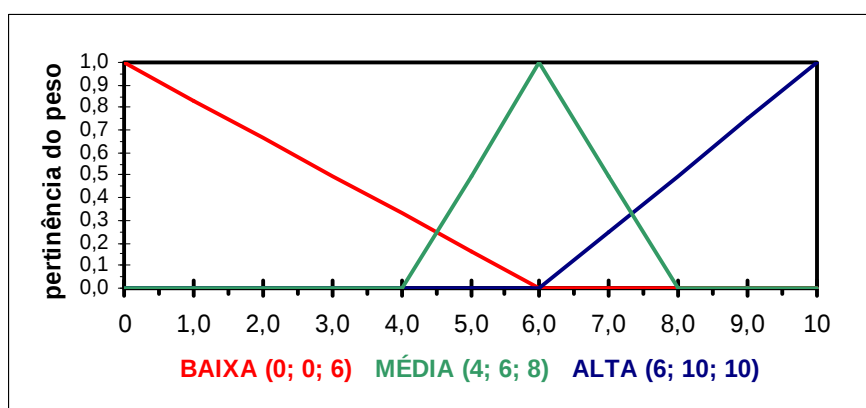


Figura 30 - Gráfico da função de pertinência difusa para o aspecto Logístico

Fonte: Aguiar (2006)

O gráfico da Figura 31 apresenta os graus de pertinência da satisfação do cliente relativos ao aspecto Comercial como sendo: Baixa (0;0;5); Média (3;5;7) e Alta (5;10;10).

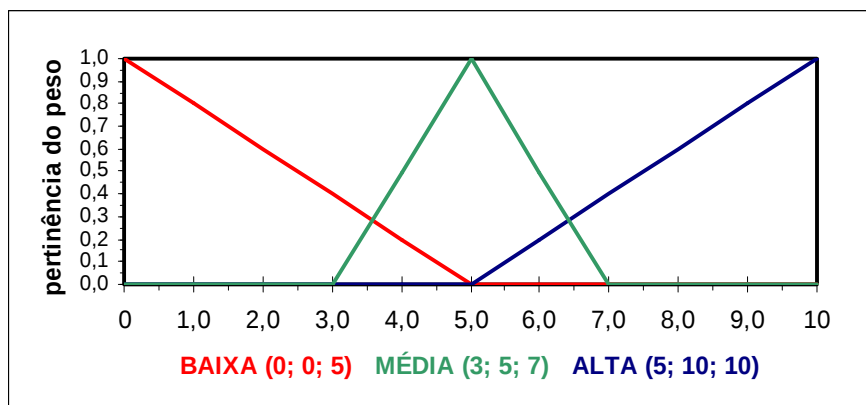


Figura 31 - Gráfico da função de pertinência difusa para o aspecto Comercial

Fonte: Aguiar (2006)

Para se controlar adequadamente um processo, é preciso codificar o conhecimento sobre o mesmo na forma de regras “SE antecedente, ENTÃO conseqüente”. De acordo com Shimizu (2001) estas regras são selecionadas para resolver um problema por meio de algoritmos que formam o mecanismo de inferência.

Com a definição dos termos primários e os graus de pertinência dos conjuntos difusos que representam cada termo, pode-se determinar estas regras que formam o algoritmo de controle. A regra é tida como uma unidade capaz de capturar um conjunto específico, sendo que um conjunto de regras é capaz de descrever um sistema em suas várias possibilidades. Cada regra é composta por uma parte antecedente (a parte SE) e uma parte conseqüente (a parte ENTÃO), resultando em uma estrutura do tipo: Se “antecedentes”, Então “conseqüentes”. Todas as circunstâncias são consideradas ao mesmo tempo, e ao final obtêm-se uma resposta que pode ser tanto um valor numérico clássico, quanto um conjunto *fuzzy*.

O número de regras é obtido de acordo com a quantidade de aspectos analisados e o número de graus de pertinência adotados em cada aspecto. Estas regras nada mais são do que todas as possíveis combinações entre os graus de pertinência dos três aspectos em questão. Assim, no caso em estudo, têm-se três aspectos (Qualidade, Logística e Comercial) associados a três graus de pertinência em cada aspecto, o que resulta em um algoritmo de controle formado por vinte e sete regras conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Regras de combinações dos graus de pertinência

REGRAS	QUALIDADE	LOGÍSTICA	COMERCIAL	Insatisf.	Satisf.
1	BAIXA	BAIXA	BAIXA	X	
2	MÉDIA	BAIXA	BAIXA	X	
3	ALTA	BAIXA	BAIXA	X	
4	BAIXA	MÉDIA	BAIXA	X	
5	MÉDIA	MÉDIA	BAIXA	X	
6	ALTA	MÉDIA	BAIXA	X	
7	BAIXA	ALTA	BAIXA	X	
8	MÉDIA	ALTA	BAIXA	X	
9	ALTA	ALTA	BAIXA	X	
10	BAIXA	BAIXA	MÉDIA	X	
11	MÉDIA	BAIXA	MÉDIA	X	
12	ALTA	BAIXA	MÉDIA	X	
13	BAIXA	MÉDIA	MÉDIA	X	
14	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA		X
15	ALTA	MÉDIA	MÉDIA		X
16	BAIXA	ALTA	MÉDIA	X	
17	MÉDIA	ALTA	MÉDIA		X
18	ALTA	ALTA	MÉDIA		X
19	BAIXA	BAIXA	ALTA	X	
20	MÉDIA	BAIXA	ALTA	X	
21	ALTA	BAIXA	ALTA	X	
22	BAIXA	MÉDIA	ALTA	X	
23	MÉDIA	MÉDIA	ALTA		X
24	ALTA	MÉDIA	ALTA		X
25	BAIXA	ALTA	ALTA	X	
26	MÉDIA	ALTA	ALTA		X
27	ALTA	ALTA	ALTA		X

Fonte: Aguiar (2006)

A modelagem *fuzzy* considera o modo como a falta de exatidão e a incerteza são descritas e, fazendo isso, tornam-se suficientemente poderosas para manipular de maneira conveniente o conhecimento. O grau de participação de uma determinada grandeza de entrada é dado em função dos termos primários definidos para o universo de discurso de entrada. Os termos formais simples tais como trapézios e triângulos limitam o grau de participação. O número de termos primários a serem utilizados depende da precisão requerida, tipo de resposta e estabilidade do sistema. Com o estabelecimento das regras e dos graus de pertinência em cada um dos aspectos, pode-se aplicar a lógica *fuzzy* tendo como dados de entrada os valores pontuados a cada cliente em cada um dos aspectos da pesquisa de satisfação. Assim, cada nota atribuída na pesquisa de satisfação é lançada no gráfico da função de pertinência difusa para

cada aspecto, ou seja, têm-se uma análise gráfica para cada aspecto de cada cliente analisado obtendo a pertinência do peso para cada grau de satisfação em que a nota se relaciona. Na análise do aspecto Qualidade, onde o valor da nota da pesquisa foi 5,60 na visão do Cliente 1, o gráfico da Figura 32 aponta a pertinência do peso μ para a satisfação baixa como sendo 0,20 e para a satisfação média se tem o valor igual a 0,30 conforme a interceptação da nota 5,60 em cada curva correspondente.

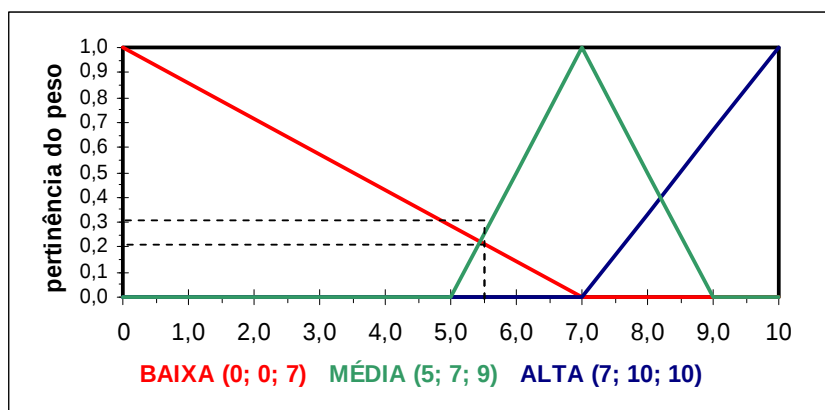


Figura 32 - Avaliação gráfica do aspecto Qualidade para o Cliente 1

Fonte: Aguiar (2006)

Para o aspecto Logística, ainda referente ao Cliente 1, a nota 6,40 resulta também numa situação intermediária pertencente a dois conjuntos de modo difuso que são de alta satisfação e de média satisfação com os valores de μ igual a 0,10 e 0,80 respectivamente. A Figura 33 demonstra a avaliação gráfica do aspecto Logística para o Cliente 1.

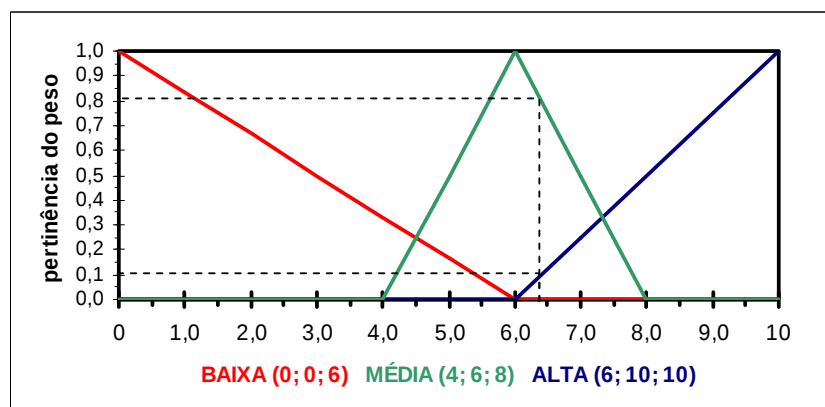


Figura 33 - Avaliação gráfica do aspecto Logística para o Cliente 1

Fonte: Aguiar (2006)

A mesma abordagem é dada para a nota 5,60 que foi atribuída pelo Cliente 1 para o aspecto Comercial. Neste caso também têm-se duas situações de atuação, a média e a

alta satisfação, com a pertinência do peso μ igual a 0,12 para a alta 0,70 para a média satisfação. A Figura 34 apresenta a avaliação gráfica do aspecto Comercial para o Cliente 1.

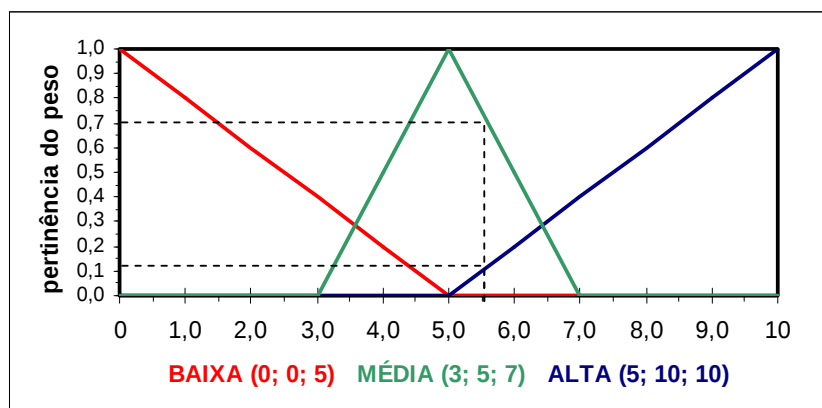


Figura 34 - Avaliação gráfica do aspecto Comercial para o Cliente 1

Fonte: Aguiar (2006)

Com a definição das pertinências do peso atuantes em cada grau de satisfação de cada aspecto, pode-se chegar a um resultado composto pela união destes conjuntos. Para cada regra, é verificado o menor valor atuante entres as pertinências dos pesos e assim define-se o valor de decisão “ α -cut” conforme dado pela Equação 2:

$$\alpha - cut = \text{Mínimo}(\mu_1; \mu_2; \mu_3) \quad (2)$$

Como no caso do Cliente 1 têm-se duas situações para cada aspecto, a união dos conjuntos é formada por seis das vinte e sete regras definidas anteriormente. Para cada combinação é obtido um valor para “ α -cut”, estando este associado a uma resposta positiva ou negativa, ou seja, cliente satisfeito ou insatisfeito conforme cada regra. A Tabela 8 demonstra estes valores para o caso do Cliente 1.

Tabela 8 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o Cliente 1

REGRAS	QUALIDADE	LOGÍSTICA	COMERCIAL	α -cut (ins.)	α -cut (sat.)
13	0,20	0,80	0,70	0,20	
14	0,30	0,80	0,70		0,30
16	0,20	0,10	0,70	0,10	
17	0,30	0,10	0,70		0,10
22	0,20	0,80	0,12	0,12	
23	0,30	0,80	0,12		0,12
25	0,20	0,10	0,12	0,10	
26	0,30	0,10	0,12		0,10

Fonte: Aguiar (2006)

Esta mesma abordagem gráfica foi dada para os Clientes 2, 3, 4 e 5. Em cada caso foram obtidas as pertinências dos pesos referentes a cada grau de satisfação cabível a cada nota em cada aspecto de avaliação. Os dados de cada cliente se encaixam em um perfil distinto dentro das regras de combinações e, conseqüentemente, com apontamento de valores de decisão específicos em cada caso.

As Tabelas 9, 10, 11 e 12 apresentam estes valores para os Clientes 2, 3, 4 e 5 respectivamente. Pode ser observado que para os Clientes 2 e 3 são aplicadas apenas quatro regras. No caso do Cliente 2, a nota 8,00 obtida com o aspecto Logística corresponde apenas à faixa de alta satisfação do cliente com valor de μ igual a 0,50, sendo que o valor para a média satisfação é nulo. O mesmo ocorre com o aspecto Comercial para o Cliente 3, onde a nota 7,20 corresponde apenas à uma faixa de satisfação, que é a de alta satisfação com a pertinência do peso μ igual a 0,44.

Tabela 9 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o Cliente 2

REGRAS	QUALIDADE	LOGÍSTICA	COMERCIAL	α -cut (ins.)	α -cut (sat.)
16	0,09	0,50	0,50	0,09	
17	0,70	0,50	0,50		0,50
25	0,09	0,50	0,20	0,09	
26	0,20	0,50	0,20		0,20

Fonte: Aguiar (2006)

Tabela 10 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o Cliente 3

REGRAS	QUALIDADE	LOGÍSTICA	COMERCIAL	α -cut (ins.)	α -cut (sat.)
23	0,70	0,60	0,44		0,44
24	0,20	0,60	0,44		0,20
26	0,70	0,20	0,44		0,20
27	0,20	0,20	0,44		0,20

Fonte: Aguiar (2006)

Tabela 11 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o Cliente 4

REGRAS	QUALIDADE	LOGÍSTICA	COMERCIAL	α -cut (ins.)	α -cut (sat.)
11	0,90	0,13	0,70	0,13	
12	0,07	0,13	0,70	0,13	
14	0,90	0,60	0,70		0,60
15	0,07	0,60	0,70		0,07
20	0,90	0,13	0,12	0,12	
21	0,07	0,13	0,12	0,07	
23	0,90	0,60	0,12		0,12
24	0,07	0,60	0,12		0,07

Fonte: Aguiar (2006)

Tabela 12 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o Cliente 5

REGRAS	QUALIDADE	LOGÍSTICA	COMERCIAL	α -cut (ins.)	α -cut (sat.)
13	0,09	0,80	0,70	0,09	
14	0,70	0,80	0,70		0,70
16	0,09	0,10	0,70	0,09	
17	0,70	0,10	0,70		0,10
22	0,09	0,80	0,12	0,09	
23	0,70	0,80	0,12		0,12
25	0,09	0,10	0,12	0,09	
26	0,70	0,10	0,12		0,10

Fonte: Aguiar (2006)

Para interpretar a distribuição das possibilidades da saída de um modelo lingüístico *fuzzy* de forma quantitativa, usa-se o procedimento de desfuzzificação, a partir do qual é fornecido um valor numérico representativo que captura o significado essencial dessa distribuição de possibilidades. No estágio do desfuzzificador, a

variável difusa produzida na fuzzificação é transformada em variável numérica (determinística) que atuará no processo de forma a regulá-lo. Moré (2004) afirma que o processo de desfuzzificação pode ser definido como uma função que associa a cada conjunto *fuzzy* um elemento que o represente. Conforme relatado por Aguiar (2006), existem várias técnicas para a desfuzzificação, sendo que a utilizada neste estudo é a do baricentro, na qual calcula-se a área da curva da variável lingüística de saída produzida pela máquina de inferência e acha-se o índice correspondente que divide esta área pela metade conforme a Equação 3:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n \mu \cdot A(x_i) \cdot x_i}{\sum_{x=1}^n \mu \cdot A(x_i)} \quad (3)$$

Onde “n” é o número de níveis de quantização, μ é o centro da função de pertinência individual e “A(xi)” é a área de uma função de pertinência modificada pelo resultado de inferência *fuzzy* (valores não nulos). O gráfico da Figura 35 indica a regra adotada como critério de aceitação do grau de satisfação do cliente, sendo insatisfeito para uma pontuação menor que 50% e, satisfeito se maior que 50 %.

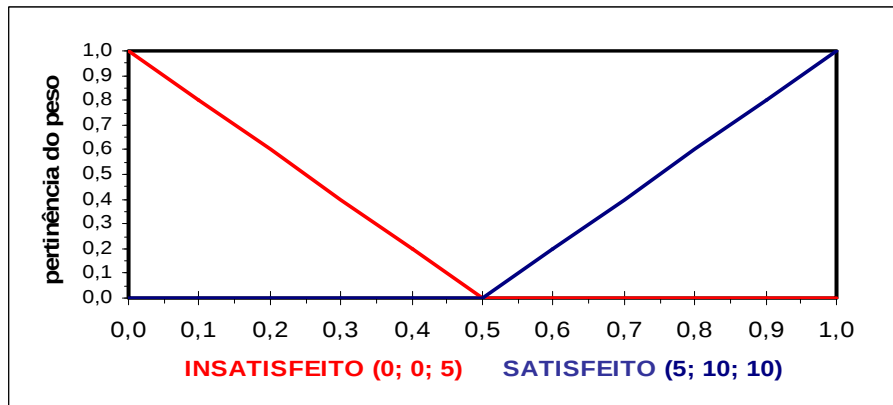


Figura 35 - Gráfico do critério de aceitação para a satisfação dos clientes

Fonte: Aguiar (2006)

Na desfuzzificação são considerados apenas os maiores valores obtidos para cada uma das variáveis resposta (α -cut Sat. / α -cut Ins.) conforme definido na Tabela 13.

Tabela 13 - Maiores valores das variáveis resposta para cada Cliente

CONDIÇÃO	α -cut (ins.)	α -cut (sat.)
Cliente 1	0,20	0,30
Cliente 2	0,09	0,50
Cliente 3	-	0,44
Cliente 4	0,13	0,60
Cliente 5	0,09	0,70

Fonte: Aguiar (2006)

Com base nos valores escalares da Figura 35, descobre-se quais termos lingüísticos são selecionados. No caso da avaliação do Cliente 1, a pertinência do peso para a condição “satisfeito” (α -cut Sat.) de 0,30 resulta na figura geométrica à direita do gráfico da Figura 36. Já a pertinência do peso para a condição “insatisfeito” (α -cut Ins.) de 0,20 resulta na figura geométrica à esquerda do mesmo gráfico. No Apêndice 3 tem-se um maior detalhamento sobre o método de desfuzzificação aplicado.

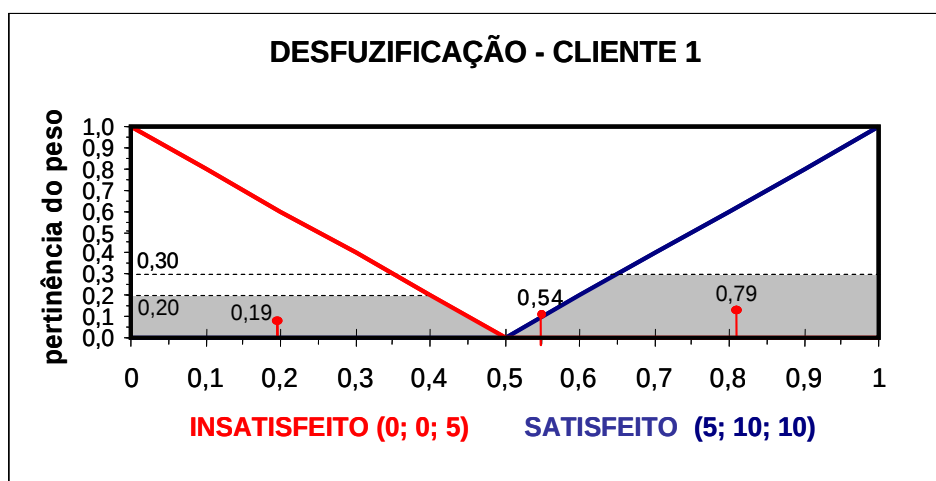


Figura 36 - Esquematização gráfica da desfuzzificação para o Cliente 1

Fonte: Aguiar (2006)

O valor final de 0,54 resulta da média dos valores 0,19 e 0,79 referentes à coordenada em X do ponto do baricentro dos trapézios da condição de “insatisfeito” e da condição de “satisfeito” respectivamente. Esta foi a pontuação final para o grau de satisfação do Cliente 1. Para os Clientes 2, 3, 4 e 5 adota-se o mesmo procedimento de desfuzzificação e assim, obtemos a Figura 37 que apresenta os resultados finais após a aplicação da metodologia *fuzzy*.

Caso	Nota final
Cliente 1	0,54
Cliente 2	0,70
Cliente 3	0,80
Cliente 4	0,68
Cliente 5	0,73

Figura 37 - Pontuação final para cada cliente

Fonte: Aguiar (2006)

Com a parametrização apresentada, mesmo com uma diferença de 0,26 pontos entre o cliente de maior pontuação e o de menor pontuação, em todos os casos a resposta final foi dentro de uma condição de satisfação para os clientes analisados, já que todas as notas ficaram acima de 0,50.

De certa forma pode-se identificar que, mesmo estando todos dentro do grau de satisfação, existem clientes mais satisfeitos do que outros. Mesmo não existindo uma diferenciação entre as saídas deste estudo (clientes satisfeitos e clientes insatisfeitos), a teoria de conjuntos *fuzzy* apresenta uma flexibilidade que permite a realização de alguns ajustes, já que se trata de um estudo inicial para o cenário apresentado. Estes ajustes têm foco na parametrização e podem ser aplicados tanto nas regras, como na fuzzificação ou na desfuzzificação.

4 APLICAÇÃO

4.1 IDENTIFICAÇÃO DAS DIFICULDADES NA APLICAÇÃO DO FMEA

Stamatis (1995) diz que existem dificuldades relacionadas tanto às equipes quanto aos indivíduos que as compõem. Silva e Antonietti (2003) definem as dificuldades relacionadas às equipes como sendo: o FMEA feito apenas porque é obrigatório; repetição de velhas informações; assuntos triviais discutidos; equipes não preparadas; tarefas vagas; falta de sumário; falta de tempo e vontade para lidar com o inesperado; erros causados por desentendimentos; descoberta da necessidade de obtenção de dados adicionais; dados incompletos devido à dificuldade de preencher o formulário; dados incompletos ou parciais devido a alguns receios pessoais; falha na utilização dos dados existentes. As dificuldades individuais são descritas por Silva e Antonietti (2003) como sendo: pessoas que falam muito; pessoas que falam muito pouco; pessoas que dizem coisas não relacionadas com a reunião em si. Estas dificuldades associadas implicam na ocorrência de irregularidades na utilização do FMEA de processo que resultam numa queda da eficiência de sua aplicação, comprometendo assim os objetivos reais da sua utilização, que estão ligados aos seus benefícios.

Teng *et al.* (2006) destacam que o centro do esforço da implantação do FMEA dentro do setor automotivo está nas plantas dos fornecedores. Para assegurar o sucesso da implantação do FMEA, é preciso entender os problemas que acontecem nas atuais práticas de FMEA destes fornecedores. Desta forma, para a identificação destas irregularidades ocorrentes na utilização do FMEA de processo foram analisados os FMEAs de onze empresas conforme apresentado no Anexo 1. Estas empresas pertencem à cadeia automotiva e se classificam como organizações de pequeno e médio porte, sendo todas com o sistema de gestão certificado, seja a certificação ISO 9001:2000, seja a certificação ISO/TS 16949:2002. Quanto ao segmento de atuação, estas empresas formam um conjunto bem heterogêneo, já que tem-se diferentes segmentos de atuação como: Trefilação; Caldeiraria; Fixadores; Usinagem; Estamparia, sendo que na família de fixadores estão sendo consideradas as empresas

fabricantes de porcas, parafusos e rebites. Tais empresas fazem parte do quadro de fornecedores de uma organização sistemista pertencente ao nível um da cadeia de fornecimento automotiva, e o critério de escolha de seus FMEAs para o presente estudo teve como base o baixo índice de qualidade dos produtos por estas fornecidos no período de janeiro a dezembro de 2006. A Figura 38 apresenta a distribuição destas empresas quanto ao ramo de atuação e à certificação possuída em termos de gestão do sistema da qualidade.

Empresa	Gama de produtos fornecidos	Certificação
1	Porcas e Parafusos	ISO/TS 16949
2	Parafusos	ISO 9001
3	Parafusos	ISO/TS 16949
4	Porcas	ISO/TS 16949
5	Usinagem (buchas e espaçadores)	ISO 9001
6	Estamparia leve (arruelas)	ISO/TS 16949
7	Caldeiraria em chapa fina	ISO 9001
8	Caldeiraria em chapa grossa	ISO 9001
9	Usinagem de precisão	ISO/TS 16949
10	Trefilação de tubos sem costura	ISO 9001
11	Trefilação de tubos com costura	ISO/TS 16949

Figura 38 - Detalhamento das empresas estudadas

Neste cenário têm-se a ocorrência de vinte e um tipos de irregularidades diferentes distribuídas nas quatro etapas de execução do FMEA anteriormente apresentadas. Vale destacar que trata-se de uma pesquisa qualitativa, de forma a ser considerada apenas uma ocorrência por cada documento verificado, ou seja, mesmo que um formulário de FMEA de processo apresente várias deficiências do mesmo tipo, apenas uma será considerada para o apontamento.

4.1.1 Identificação das irregularidades referentes à Etapa 1 de execução do FMEA

Dentro do que foi definido como primeira etapa de execução do FMEA, os documentos estudados apresentam sete tipos diferentes de irregularidades, sendo estas referentes à definição do modo de falha, definição do efeito e critérios de pontuação da severidade, bem como identificação da classificação conforme apresentado na Figura 39.

Categoria		Código	Irregularidade	Quantidade
ETAPA 1	ITEM / FUNÇÃO + MODO DE FALHA + EFEITO POTENCIAL + SEVERIDADE + CLASSIFICAÇÃO	1.1	DESCRIÇÃO GENÉRICA E NÃO TÉCNICA DO MODO DE FALHA	4
		1.2	MODO DE FALHA NÃO RELACIONADO COM A FUNÇÃO DO PROCESSO	8
		1.3	EFEITO NÃO LIGADO AO MODO DE FALHA	3
		1.4	O EFEITO NÃO CONSIDERA A PERCEPÇÃO DO CLIENTE	2
		1.5	DESCRIÇÃO GENÉRICA E NÃO TÉCNICA DO EFEITO	8
		1.6	INCONSISTÊNCIA NOS VALORES DE PONTUAÇÃO DE SEVERIDADE E IDENTIFICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO	5
		1.7	VALOR DA SEVERIDADE VARIANDO PARA UM MESMO EFEITO	3

Figura 39 - Levantamento das irregularidades referentes à etapa 1

4.1.2 Identificação das irregularidades referentes à Etapa 2 de execução do FMEA

No escopo da definição da segunda etapa de execução do FMEA, os documentos estudados apresentam quatro tipos diferentes de irregularidades, sendo dois referentes à definição da causa e outros dois relacionados à pontuação da ocorrência. Estes dados são apresentados na Figura 40.

Categoria		Código	Irregularidade	Quantidade
ETAPA 2	CAUSA + OCORRÊNCIA	2.1	DEFINIÇÃO GENÉRICA DA CAUSA, DISTANTE DA CAUSA RAÍZ	6
		2.2	CAUSA NÃO LIGADA AO MODO DE FALHA	4
		2.3	PONTUAÇÃO DE OCORRÊNCIA NÃO RELACIONADA COM A CAUSA	2
		2.4	VARIAÇÃO DA PONTUAÇÃO DE OCORRÊNCIA PARA UMA MESMA CAUSA	3

Figura 40 - Levantamento das irregularidades referentes à etapa 2

4.1.3 Identificação das irregularidades referentes à Etapa 3 de execução do FMEA

Para as definições de controle preventivo, controle de detecção e ainda para a pontuação de detecção que abrangem a terceira etapa de execução do FMEA, foram encontrados cinco tipos diferentes de irregularidades, sendo duas referentes à prevenção, uma relacionada à descrição dos controles e ainda duas ligadas à pontuação da detecção. A Figura 41 apresenta estes dados com maiores detalhes.

Categoria		Código	Irregularidade	Quantidade
ETAPA 3	CONTROLE PREVENTIVO + CONTROLE DETECTIVO + DETECÇÃO	3.1	O CONTROLE PREVENTIVO NÃO ATUA NA CAUSA	8
		3.2	NÃO APRESENTA CONTROLE PREVENTIVO, APENAS CONTROLE DETECTIVO	3
		3.3	CONTROLE COM DESCRIÇÃO GENÉRICA OU REFERENCIANDO DOCUMENTO INTERNO	2
		3.4	O CONTROLE DE DETECÇÃO NÃO ESTÁ RELACIONADO COM O MODO DE FALHA	3
		3.5	VARIAÇÃO DA PONTUAÇÃO DE DETECÇÃO PARA MESMO CONTROLE	2

Figura 41 - Levantamento das irregularidades referentes à etapa 3

4.1.4 Identificação das irregularidades referentes à Etapa 4 de execução do FMEA

Dentro do que foi definido como quarta e última etapa de execução do FMEA, que aborda a coluna de NPR e as demais relativas às ações recomendadas, foram encontrados cinco tipos diferentes de irregularidades de execução do FMEA. A Figura 42 apresenta as irregularidades encontradas referentes à quarta etapa do FMEA.

Categoria		Código	Irregularidade	Quantidade
ETAPA 4	NPR + AÇÕES RECOMENDADAS	4.1	BUSCA DO ÍNDICE DE NPR INFERIOR À NOTA DE CORTE / ERROS DE MULTIPLICAÇÃO	2
		4.2	BAIXO NÍVEL DE TOMADA DE AÇÃO	2
		4.3	INDEFINIÇÃO DE RESPONSÁVEL E PRAZO	2
		4.4	AÇÕES SEM FOCO PREVENTIVO / VALOR AGREGADO	1
		4.5	AÇÕES ATRASADAS	1

Figura 42 - Levantamento das irregularidades referentes à etapa 4

Com base na identificação das irregularidades na aplicação do FMEA, divididas entre as quatro fases abordadas, têm-se um panorama de tais irregularidades conforme apresentado na Figura 43. Para a identificação da gravidade de cada irregularidade identificada, será feito um estudo comparativo par a par entre as irregularidades dentro de cada uma das quatro fases pela aplicação do método AHP. A comparação global, que consiste em comparar as fases de execução do FMEA será realizada numa etapa posterior através da aplicação de *fuzzy sets*.

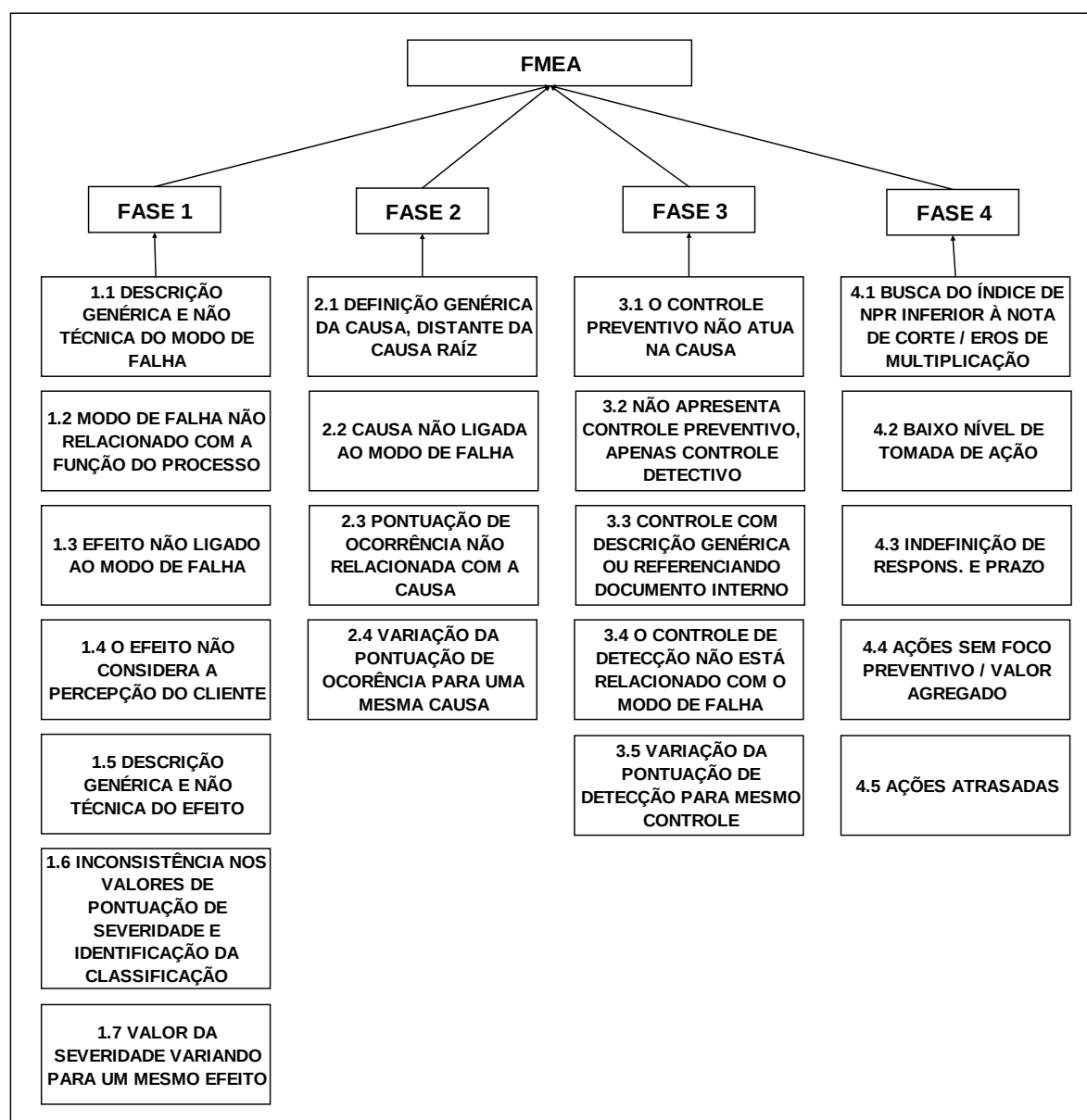


Figura 43 - Panorama das irregularidades levantadas na utilização do FMEA de processo

4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP

Com as estruturas hierárquicas já definidas, é possível construir as matrizes de comparação paritária onde, segundo Shimizu (2001), o decisor elabora as matrizes de relacionamentos, definindo o grau de importância do relacionamento de cada fator com o fator a ser comparado, estabelecendo assim as prioridades. No estudo em questão, os fatores a serem comparados são as irregularidades identificadas dentro de cada etapa de execução do FMEA e, o grau de importância, trata do tanto que a ocorrência de cada irregularidade reflete na queda do desempenho da aplicação do FMEA dentro de cada uma das quatro etapas.

Saaty (2001) recomenda o uso de no máximo nove fatores, pois além deste número a matriz torna-se inconsistente. No presente estudo tem-se sete, quatro, cinco e cinco critérios a serem comparados em quatro categorias que consistem, respectivamente, nas etapas de execução do FMEA de um a quatro. Desta forma, são formadas quatro matrizes de julgamentos, uma para cada etapa, sendo que todos os julgamentos são realizados a partir da aplicação da Escala Fundamental de Saaty (Figura 27).

Todos os julgamentos foram realizados pelo próprio autor que, durante a atuação na área de qualidade familiarizou-se com a aplicação do FMEA de processo, e, atuando como Engenheiro da Qualidade em diversos produtos e realidades fabris, pode observar detalhes e dificuldades específicas na aplicação de tal ferramenta. Estas comparações paritárias foram realizadas com a aplicação da Escala Fundamental de Saaty. A Tabela 14 apresenta a matriz de comparação paritária do AHP referente às irregularidades identificadas na primeira etapa de execução do FMEA, onde, por exemplo, a irregularidade “modo de falha não relacionado com a função do processo”, codificada por 1.2, é de igual importância quando comparada à irregularidade “efeito não ligado ao modo de falha”, codificada por 1.3, já que os dois elementos contribuem igualmente para a queda do desempenho da aplicação do FMEA.

Tabela 14 - Julgamentos e prioridade das irregularidades identificadas para a etapa 1 do FMEA.

Cód.	Irregularidade	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	PR
1.1	DESCRIÇÃO GENÉRICA E NÃO TÉCNICA DO MODO DE FALHA	1	1/5	1/5	1/7	1	1/3	1/3	0,036
1.2	MODO DE FALHA NÃO RELACIONADO COM A FUNÇÃO DO PROCESSO	5	1	1	1/3	5	3	3	0,187
1.3	EFEITO NÃO LIGADO AO MODO DE FALHA	5	1	1	1/3	5	3	3	0,187
1.4	O EFEITO NÃO CONSIDERA A PERCEPÇÃO DO CLIENTE	7	3	3	1	7	5	5	0,387
1.5	DESCRIÇÃO GENÉRICA E NÃO TÉCNICA DO EFEITO	1	1/5	1/5	1/7	1	1/3	1/3	0,036
1.6	INCONSISTÊNCIA NOS VALORES DE PONTUAÇÃO DE SEVERIDADE E IDENTIFICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO	3	1/3	1/3	1/5	3	1	1	0,083
1.7	VALOR DA SEVERIDADE VARIANDO PARA UM MESMO EFEITO	3	1/3	1/3	1/5	3	1	1	0,083
TOTAIS		25,000	6,067	6,067	2,352	25,000	13,667	13,667	1,000

Para o julgamento da primeira etapa de execução do FMEA, o valor de *CR* (Taxa de coerência) obtido é aproximadamente igual a 0,020. A Figura 44 traz uma apresentação gráfica das prioridades relativas referentes a este julgamento, onde a irregularidade “o efeito não considera a percepção do cliente”, codificada por 1.4, apresenta o valor de aproximadamente 39%, o que indica que o FMEA que apresentar este tipo de irregularidade estará tendo um desempenho bem menor do que aquele que apresentar, por exemplo, a irregularidade “descrição genérica e não técnica do efeito”, codificada por 1.5 e com valor de 3,6%.

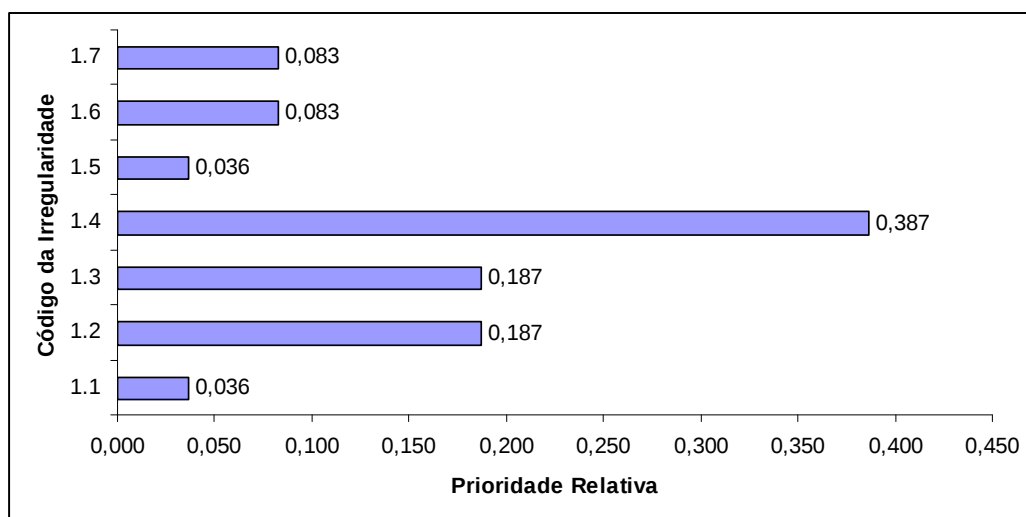


Figura 44 - Gráfico das prioridades relativas referente à etapa 1 do FMEA

Para a segunda etapa de execução do FMEA foram identificados quatro tipos de irregularidades, que formam os critérios a serem comparados. A Tabela 15 apresenta a matriz de comparação paritária do AHP referente às irregularidades identificadas na segunda etapa de execução do FMEA. As comparações realizadas com a aplicação da Escala Fundamental de Saaty, trazem, por exemplo, a irregularidade “causa não ligada ao modo de falha”, codificada por 2.2, como sendo de fraca importância sobre a irregularidade “variação da pontuação de ocorrência para uma mesma causa”, codificada por 2.4, já que o julgamento é levemente a favor de 2.2 em relação a 2.4, em termos de contribuição para a queda do desempenho da aplicação do FMEA.

Tabela 15 - Julgamentos e prioridade das irregularidades identificadas para a etapa 2 do FMEA

Cód.	Irregularidade	2.1	2.2	2.3	2.4	PR
2.1	DEFINIÇÃO GENÉRICA DA CAUSA, DISTANTE DA CAUSA RAÍZ	1	1/5	1/3	1/3	0,079
2.2	CAUSA NÃO LIGADA AO MODO DE FALHA	5	1	3	3	0,519
2.3	PONTUAÇÃO DE OCORRÊNCIA NÃO RELACIONADA COM A CAUSA	3	1/3	1	1	0,201
2.4	VARIAÇÃO DA PONTUAÇÃO DE OCORRÊNCIA PARA UMA MESMA CAUSA	3	1/3	1	1	0,201
TOTAIS		12,000	1,867	5,333	5,333	1,000

O valor de *CR* (Taxa de coerência) obtido também é aproximadamente igual a 0,020 para o julgamento da Segunda etapa de execução do FMEA. A Figura 45 traz uma apresentação gráfica das prioridades relativas referentes a este julgamento, onde a irregularidade “causa não ligada ao modo de falha”, codificada por 2.2, apresenta o valor de aproximadamente 52%, o que indica que o FMEA que apresentar este tipo de irregularidade estará tendo um desempenho bem menor do que aquele que apresentar, por exemplo, a irregularidade “descrição genérica da causa, distante da causa raiz”, codificada por 2.1 e com valor de aproximadamente 8%.

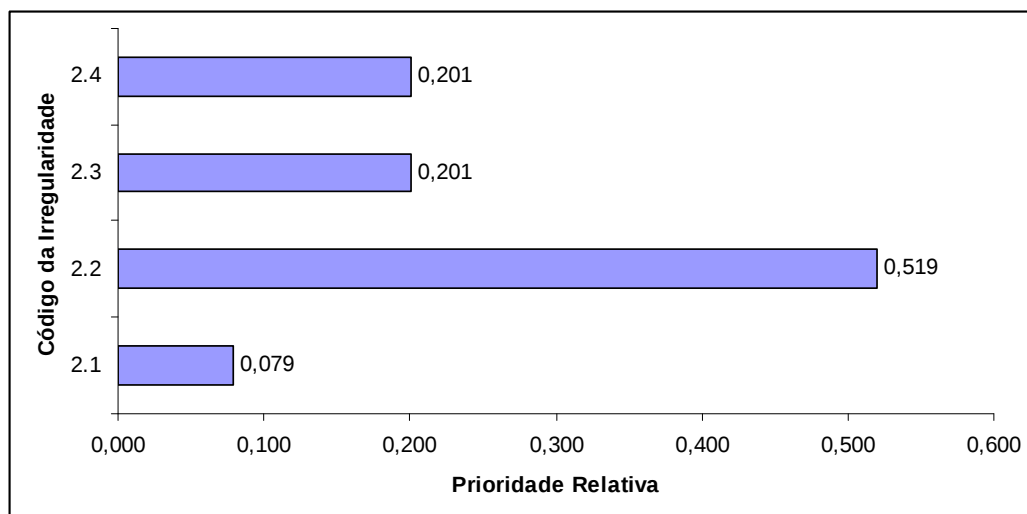


Figura 45 - Gráfico das prioridades relativas referente à etapa 2 do FMEA

A Tabela 16 apresenta a matriz de comparação paritária do AHP referente às irregularidades identificadas na terceira etapa de execução do FMEA. Esta matriz foi criada a partir dos cinco tipos diferentes de irregularidades identificados nesta etapa. Com a aplicação da Escala Fundamental de Saaty se dá a atribuição dos julgamentos, onde, por exemplo, a irregularidade “não apresenta controle preventivo, apenas controle detectivo”, codificada por 3.2, é de importância muito forte quando comparada à irregularidade “controle com descrição genérica ou referenciando documento interno”, codificada por 3.3, já que o elemento 3.2 é fortemente favorecido e sua dominância em relação ao elemento 3.3, em termos de contribuição para a queda do desempenho da aplicação do FMEA, pode ser facilmente demonstrada.

Tabela 16 - Julgamentos e prioridade das irregularidades identificadas para a etapa 3 do FMEA.

Cód.	Irregularidade	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	PR
3.1	O CONTROLE PREVENTIVO NÃO ATUA NA CAUSA	1	1/3	5	3	3	0,245
3.2	NÃO APRESENTA CONTROLE PREVENTIVO, APENAS CONTROLE DETECTIVO	3	1	7	5	5	0,497
3.3	CONTROLE COM DESCRIÇÃO GENÉRICA OU REFERENCIANDO DOCUMENTO INTERNO	1/5	1/7	1	1/3	1/3	0,047
3.4	O CONTROLE DE DETECÇÃO NÃO ESTÁ RELACIONADO COM O MODO DE FALHA	1/3	1/5	3	1	1	0,105
3.5	VARIAÇÃO DA PONTUAÇÃO DE DETECÇÃO PARA MESMO CONTROLE	1/3	1/5	3	1	1	0,105
TOTAIS		4,867	1,876	19,000	10,333	10,333	1,000

Para o julgamento da terceira etapa, o valor de CR (Taxa de coerência) obtido é aproximadamente igual a 0,03. A Figura 46 traz uma apresentação gráfica das prioridades relativas referentes a este julgamento, onde a irregularidade “não apresenta controle preventivo, apenas controle detectivo”, codificada por 3.2, apresenta o valor de aproximadamente 50%, o que indica que o FMEA que apresentar este tipo de irregularidade estará tendo um desempenho bem menor do que aquele que apresentar, por exemplo, a irregularidade “controle com descrição genérica ou referenciando documento interno”, codificada por 3.3 e com valor de aproximadamente 5%.

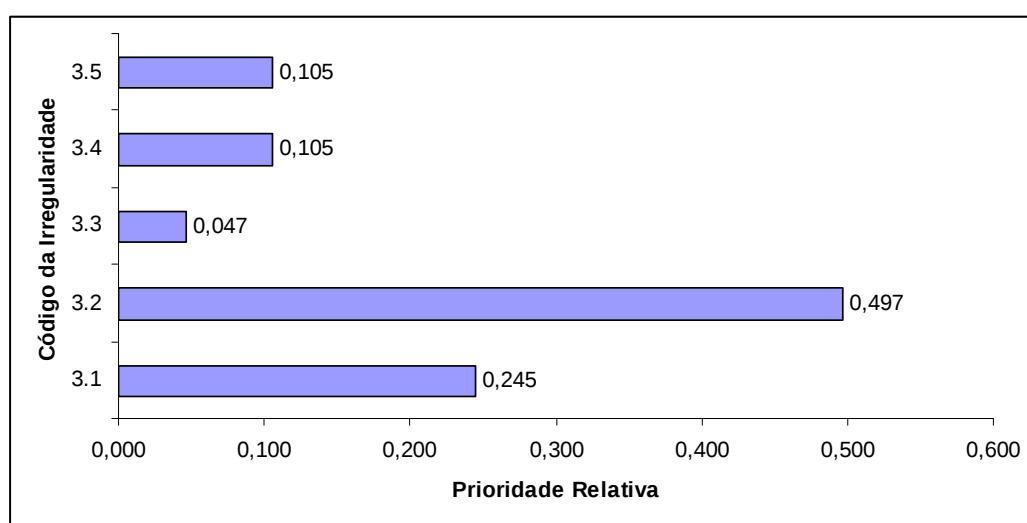


Figura 46 - Gráfico das prioridades relativas referente à etapa 3 do FMEA

A matriz de comparação paritária referente às irregularidades identificadas na quarta etapa de execução do FMEA é apresentada na Tabela 17. Todas as comparações são realizadas com a aplicação da Escala Fundamental de Saaty, onde, por exemplo, a irregularidade “ações atrasadas”, codificada por 4.5, é de igual importância quando comparada à irregularidade “indefinição de responsável e prazo”, codificada por 4.3, já que os dois elementos contribuem igualmente para a queda do desempenho da aplicação do FMEA.

Tabela 17 - Julgamentos e prioridade das irregularidades identificadas para à etapa 4 do FMEA.

Cód.	Irregularidade	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	PR
4.1	BUSCA DO ÍNDICE DE NPR INFERIOR À NOTA DE CORTE / ERROS DE MULTIPLICAÇÃO	1	1/3	3	1	3	0,195
4.2	BAIXO NÍVEL DE TOMADA DE AÇÃO	3	1	5	3	5	0,462
4.3	INDEFINIÇÃO DE RESPONS. E PRAZO	1/3	1/5	1	1/3	1	0,074
4.4	AÇÕES SEM FOCO PREVENTIVO / VALOR AGREGADO	1	1/3	3	1	3	0,195
4.5	AÇÕES ATRASADAS	1/3	1/5	1	1/3	1	0,074
TOTAIS		5,667	2,067	13,000	5,667	13,000	1,000

A quarta etapa de execução do FMEA tem o valor de *CR* aproximadamente igual a 0,010. A Figura 47 traz uma apresentação gráfica das prioridades relativas referentes a este julgamento, onde a irregularidade “baixo nível de tomada de ação”, codificada por 4.2, apresenta o valor de aproximadamente 46%, o que indica que o FMEA que apresentar este tipo de irregularidade estará tendo um desempenho bem menor do que aquele que apresentar, por exemplo, a irregularidade “indefinição de responsável e prazo”, codificada por 4.3 e com valor de 7,4%.

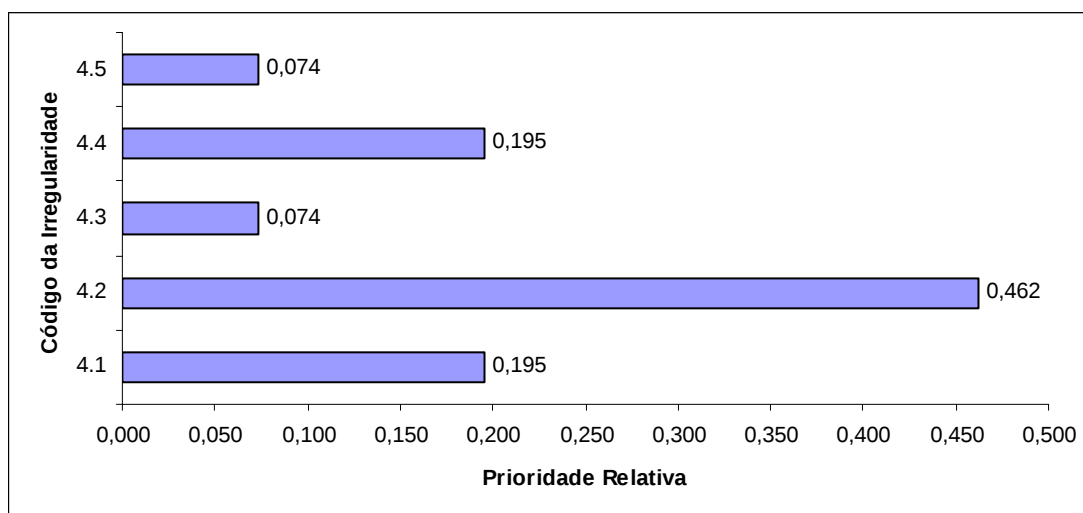


Figura 47 - Gráfico das prioridades relativas referente à etapa 4 do FMEA

4.3 PONTUAÇÃO DOS FMEAs POR ETAPA DE EXECUÇÃO

Com os dados anteriormente obtidos, que são as irregularidades identificadas na amostragem dos FMEAs analisados e o peso que cada irregularidade acarreta no desempenho de cada fase de execução do FMEA, pela aplicação do método AHP, é

possível realizar uma medição do desempenho de cada FMEA, dividida em cada etapa. Esta medição será realizada mediante a ocorrência ou não de determinada irregularidade, e será formalizada através da atribuição de notas para cada FMEA em estudo, dividindo entre as quatro fases distintas.

Para a etapa 1, as irregularidades que mais ocorreram foram: “modo de falha não relacionado com a função do processo”, codificada por 1.2; e “descrição genérica e não técnica do efeito”, codificada por 1.5; onde oito dos onze FMEAs apresentaram estas duas irregularidades. Por outro lado, apenas dois FMEAs apresentaram a irregularidade “efeito não considera a percepção o cliente”, codificada por 1.4. O FMEA que mais apresentou irregularidades foi o da Empresa 2, com a ocorrência de seis das sete irregularidades identificadas para esta etapa. A Figura 48 apresenta a distribuição dos sete tipos de irregularidades identificadas na etapa 1, com seus respectivos valores de prioridade relativa (*PR*) de acordo com a ocorrência em cada caso.

	Cód.	Irregularidade	PR	FMEAs Analisados										
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ETAPA 1	1.1	DESCRIÇÃO GENÉRICA E NÃO TÉCNICA DO MODO DE FALHA	0,036											
	1.2	MODO DE FALHA NÃO RELACIONADO COM A FUNÇÃO DO PROCESSO	0,187											
	1.3	EFEITO NÃO LIGADO AO MODO DE FALHA	0,187											
	1.4	O EFEITO NÃO CONSIDERA A PERCEPÇÃO DO CLIENTE	0,387											
	1.5	DESCRIÇÃO GENÉRICA E NÃO TÉCNICA DO EFEITO	0,036											
	1.6	INCONSISTÊNCIA NOS VALORES DE PONTUAÇÃO DE SEVERIDADE E IDENTIFICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO	0,083											
	1.7	VALOR DA SEVERIDADE VARIANDO PARA UM MESMO EFEITO	0,083											

Figura 48 - Apontamento das ocorrências de irregularidades na etapa 1

Já na etapa 2, seis dos onze FMEAs apresentaram a irregularidade “definição genérica da causa, distante da causa raiz”, codificada por 2.1, que foi a de maior ocorrência. Em contra partida, apenas dois FMEAs apresentaram a irregularidade “Pontuação da ocorrência não relacionada com a causa”, codificada por 2.3. O FMEA que mais apresentou irregularidades foi o da Empresa 5, com a ocorrência de três das quatro irregularidades identificadas para esta etapa. A Figura 49 apresenta a distribuição dos quatro tipos de irregularidades identificadas na etapa 2, com seus

respectivos valores de prioridade relativa (*PR*) de acordo com a ocorrência em cada caso.

	Cód.	Irregularidade	PR	FMEAs Analisados										
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ETAPA 2	2.1	DEFINIÇÃO GENÉRICA DA CAUSA, DISTANTE DA CAUSA RAÍZ	0,079											
	2.2	CAUSA NÃO LIGADA AO MODO DE FALHA	0,519											
	2.3	PONTUAÇÃO DE OCORRÊNCIA NÃO RELACIONADA COM A CAUSA	0,201											
	2.4	VARIAÇÃO DA PONTUAÇÃO DE OCORRÊNCIA PARA UMA MESMA CAUSA	0,201											

Figura 49 - Apontamento das ocorrências de irregularidades na etapa 2

No caso da etapa 3, as irregularidades que mais ocorreu foi “O controle preventivo não atua na causa”, codificada por 3.1, onde oito dos onze FMEAs apresentaram esta irregularidade. Já a menor ocorrência se deu na irregularidade “controle com descrição genérica ou referenciando documento interno” (3.3) e na “variação da pontuação de detecção para um mesmo controle” (3.5), onde em apenas dois FMEAs elas foram identificadas. O FMEA que mais apresentou irregularidades foi o da Empresa 1, com a ocorrência de três das cinco irregularidades identificadas para esta etapa. A Figura 50 apresenta a distribuição dos cinco tipos de irregularidades identificadas na etapa 3, com seus respectivos valores de prioridade relativa (*PR*) de acordo com a ocorrência em cada caso.

	Cód.	Irregularidade	PR	FMEAs Analisados										
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ETAPA 3	3.1	O CONTROLE PREVENTIVO NÃO ATUA NA CAUSA	0,245											
	3.2	NÃO APRESENTA CONTROLE PREVENTIVO, APENAS CONTROLE DETECTIVO	0,497											
	3.3	CONTROLE COM DESCRIÇÃO GENÉRICA OU REFERENCIANDO DOCUMENTO INTERNO	0,047											
	3.4	PONTUAÇÃO DE DETECÇÃO NÃO RELACIONADA COM OS CONTROLES	0,105											
	3.5	VARIAÇÃO DA PONTUAÇÃO DE DETECÇÃO PARA MESMO CONTROLE	0,105											

Figura 50 - Apontamento das ocorrências de irregularidades na etapa 3

Na etapa 4 têm-se um índice bem menor de ocorrência de irregularidades em comparado às outras etapas, sendo que dos cinco tipos de irregularidades identificadas, três delas estão presentes em dois FMEAs e duas aparecem em apenas um, sendo que os FMEAs das Empresas 3, 4, 6, 10 e 11 não apresentaram nenhuma irregularidade

nesta etapa. A Figura 51 apresenta a distribuição dos cinco tipos de irregularidades identificadas na etapa 4, com seus respectivos valores de prioridade relativa (*PR*) de acordo com a ocorrência em cada caso.

	Cód.	Irregularidade	PR	FMEAs Analisados										
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ETAPA 4	4.1	BUSCA DO ÍNDICE DE NPR INFERIOR À NOTA DE CORTE / ERROS DE MULTIPLICAÇÃO	0,195											
	4.2	BAIXO NÍVEL DE TOMADA DE AÇÃO	0,462											
	4.3	INDEFINIÇÃO DE RESPONS. E PRAZO	0,074											
	4.4	AÇÕES SEM FOCO PREVENTIVO / VALOR AGREGADO	0,195											
	4.5	AÇÕES ATRASADAS	0,074											

Figura 51 - Apontamento das ocorrências de irregularidades na etapa 4

A pontuação foi realizada pela ocorrência da irregularidade associada ao seu valor de prioridade relativa, através da subtração a partir de um valor inicial de 100%. Por exemplo, a Empresa 1 apresentou as irregularidades codificadas por 1.1, 1.2, 1.3 e 1.6, com respectivos valores de prioridade relativa de 0,036, 0,187, 0,187 e 0,083. Desta forma, tem-se a nota do FMEA da Empresa 1, relativo à etapa 1 como sendo:

$$1 - 0,036 - 0,187 - 0,0187 - 0,083 = 0,506$$

A Figura 52 apresenta os resultados obtidos pela avaliação dos onze FMEAs divididos pelas quatro etapas de execução. Estes valores serão os dados de entrada na aplicação dos conjuntos *fuzzy* para a avaliação de cada um dos FMEAs consultados.

FMEA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ETAPA 1	0,506	0,083	0,693	0,540	0,730	0,880	0,693	0,693	0,776	0,776	0,693
ETAPA 2	1,000	0,921	0,720	0,921	0,201	0,481	0,799	0,720	0,280	0,921	0,481
ETAPA 3	0,211	0,503	0,649	0,755	0,708	0,649	1,000	0,649	0,503	0,649	0,649
ETAPA 4	0,805	0,926	1,000	1,000	0,805	1,000	0,464	0,805	0,464	1,000	1,000

Figura 52 - Resultado da avaliação dos FMEAs das empresas de 1 a 11

4.4 ATRIBUIÇÃO DE NOTAS PARA OS FMEAS COM APLICAÇÃO DOS CONJUNTOS *FUZZY*

A fuzzyficação na interface de entrada traduz valores discretos em graus de pertinência às funções *fuzzy*. A análise *fuzzy* acontece em blocos que contêm as regras de controle lingüístico. Os resultados das operações nestes blocos de regras são também variáveis lingüísticas, que podem ser desfuzzificados em variáveis discretas (MALUTTA, 2004).

Para a avaliação dos FMEAs foram definidas quatro variáveis de entrada para cada uma das onze Empresas em estudo. Cada variável de entrada corresponde à pontuação obtida pela ocorrência das irregularidades referentes às quatro etapas do FMEA conforme apresentado anteriormente.

O número de funções de pertinência utilizado para cada indicador forma três níveis de notas, representados pelos termos lingüísticos Baixa, Média e Alta; sendo que a base variou de zero, para representar a nota Baixa, a dez, para representar a nota Alta; já os valores da nota Média variam de acordo com prioridade de cada etapa de execução do FMEA. A etapa 1 é tida como a de maior importância, uma vez que todas as outras três etapas dependem diretamente de sua execução, de forma que a ocorrência de uma irregularidade em sua aplicação pode comprometer todas as outras etapas. As etapas 2 e 3 não possuem relação direta entre si, já que uma está relacionada com a causa da falha e a outra com o seu controle, sendo assim consideradas etapas de importância moderada já que ambas refletem apenas na etapa 4. Já a etapa 4 está relacionada com o correto emprego do FMEA como um todo, e as irregularidades aqui identificadas podem ser decorrentes das irregularidades das etapas anteriores, de modo que a etapa 4 é classificada como de menor importância.

Assim, os valores de nota Média foram definidos como sendo de cinco a nove para a etapa 1 (maior importância), de quatro a oito para as etapas 2 e 3 (importância moderada), e de três a sete para a etapa 4 (menor importância), que definem uma função de pertinência triangular para cada caso conforme apresentado na Figura 53.

FMEA	Baixa	Média	Alta
ETAPA 1	0, 0, 7	5, 7, 9	7, 10, 10
ETAPA 2	0, 0, 6	4, 6, 8	6, 10, 10
ETAPA 3	0, 0, 6	4, 6, 8	6, 10, 10
ETAPA 4	0, 0, 5	3, 5, 7	5, 10, 10

Figura 53 - Graus de pertinência para a aplicação dos conjuntos fuzzy

As Figuras de 54 a 57 apresentam os gráficos e os graus de pertinência para a avaliação das etapas de 1 a 4 respectivamente.

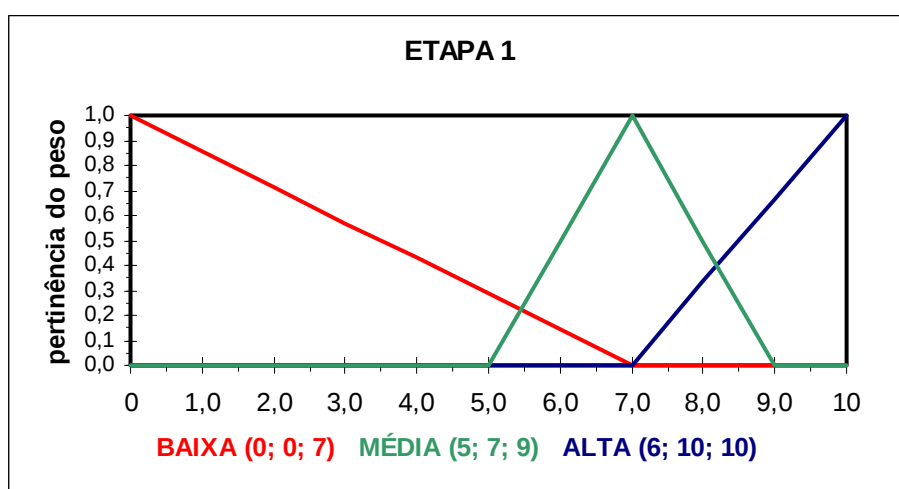


Figura 54 - Gráfico da função de pertinência difusa para a etapa 1

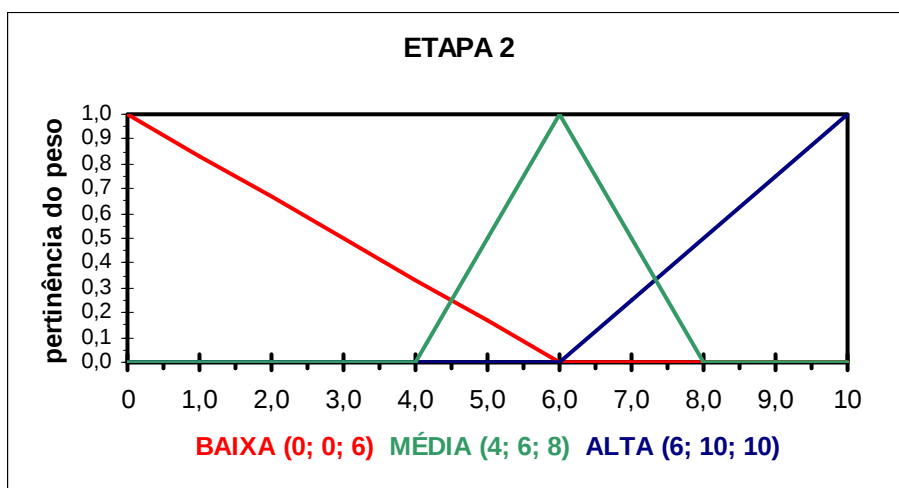


Figura 55 - Gráfico da função de pertinência difusa para a etapa 2

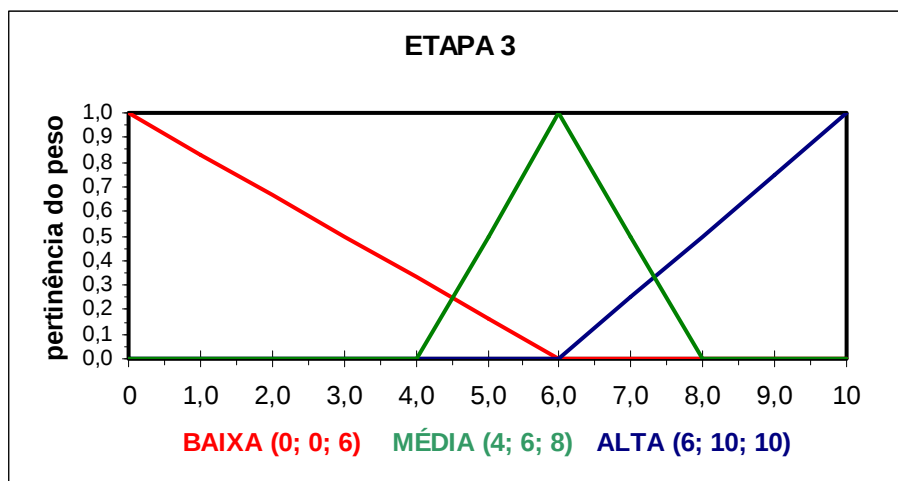


Figura 56 - Gráfico da função de pertinência difusa para a etapa 3

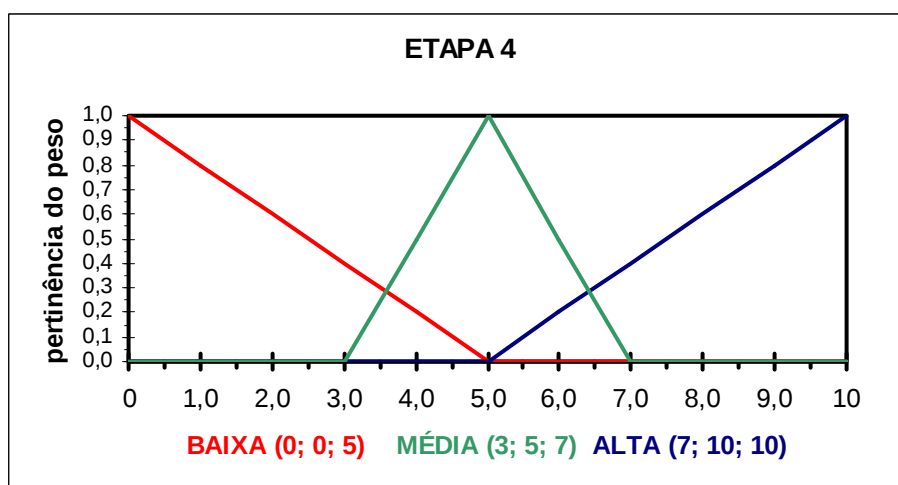


Figura 57 - Gráfico da função de pertinência difusa para a etapa 4

Com a definição da quantidade de etapas a serem comparadas e o número de graus de pertinência adotados em cada etapa, é possível determinar as regras para a aplicação dos conjuntos *fuzzy*. Com a associação das quatro etapas a serem comparadas associadas aos três níveis de avaliação das notas (Baixa, Média e Alta) em cada etapa, tem-se a aplicação de um algoritmo de controle formado por oitenta e uma regras de acordo com a combinação entre estes fatores. A relação de tais regras está apresentada no Apêndice 1, sendo não aceitável o FMEA que apresentar mais de uma etapa com a nota no nível de avaliação baixa. Para os casos onde a nota da etapa foi igual a 1, significa que não houve identificação de irregularidade para aquela etapa daquele determinado FMEA, o que vai resultar num número menor de regras nestas situações.

Com o estabelecimento das regras e dos graus de pertinência em cada etapa, é aplicada a lógica *fuzzy* tendo como dados de entrada os valores pontuados conforme apresentados anteriormente na Figura 52 multiplicados por dez para que o campo de notas esteja entre os valores zero e dez. Assim, cada nota atribuída através da ocorrência da irregularidade associada ao peso definido na aplicação do método AHP é lançada no gráfico da função de pertinência difusa para cada etapa, ou seja, têm-se uma análise gráfica para cada etapa de cada FMEA analisado, obtendo a pertinência do peso para cada grau de avaliação em que a nota se relaciona. Na análise do FMEA da Empresa 1 o valor da nota atribuída para a etapa 1 foi 5,06 que resulta numa situação intermediária pertencente a dois conjuntos de modo difuso. O gráfico da Figura 58 aponta a pertinência do peso μ para a nota Baixa como sendo 0,28 e para a nota Média se tem o valor igual a 0,03 conforme a interceptação da nota 5,06 em cada curva correspondente.

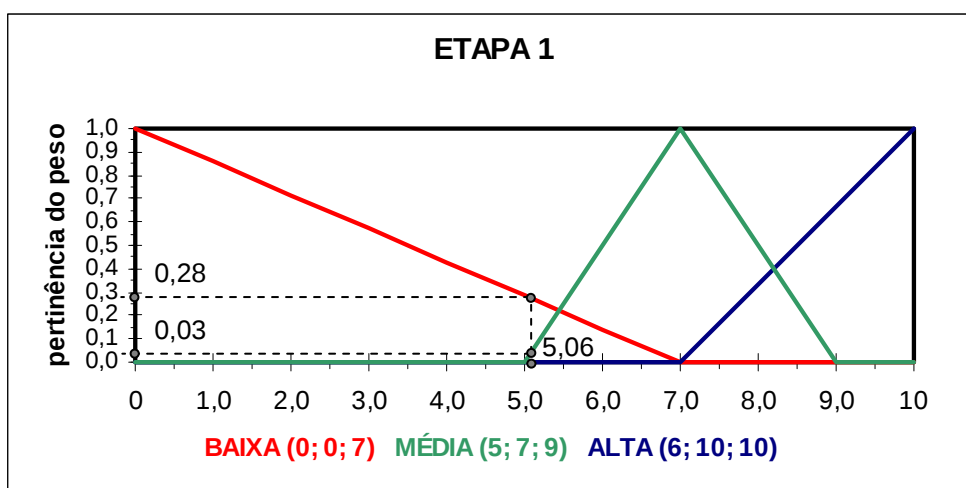


Figura 58 - Avaliação gráfica para a etapa 1 do FMEA da Empresa 1

Para a etapa 2, ainda referente ao FMEA da Empresa 1, a nota 10,0 indica que nenhuma irregularidade foi identificada neste FMEA para esta etapa, resultando num valor de μ igual a 1,0. A Figura 59 demonstra a avaliação gráfica da etapa 2 do FMEA da Empresa 1.

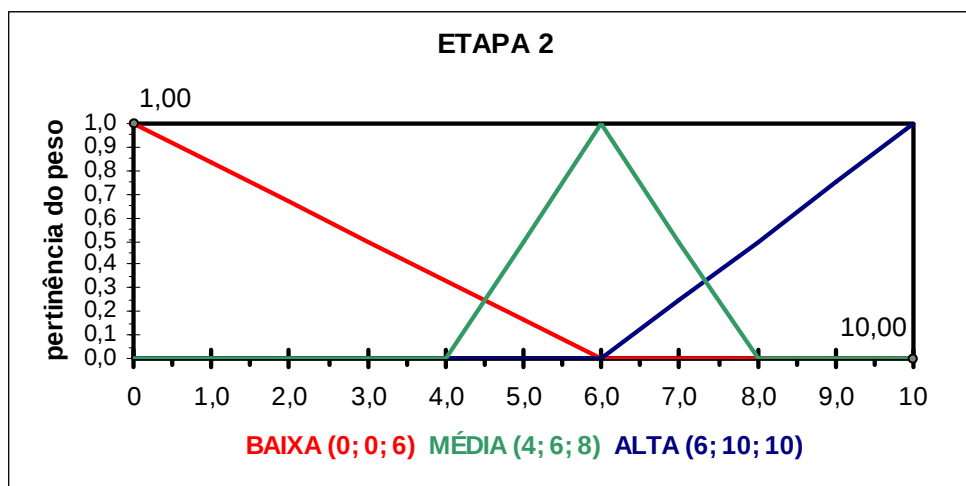


Figura 59 - Avaliação gráfica para a etapa 2 do FMEA da Empresa 1

A mesma abordagem é dada para a nota 2,11 que foi atribuída no FMEA 1 para a etapa 3, onde a pertinência do peso μ é igual a 0,65 para a nota Baixa. A Figura 60 apresenta a avaliação gráfica do para a etapa 3 do FMEA da empresa 1.

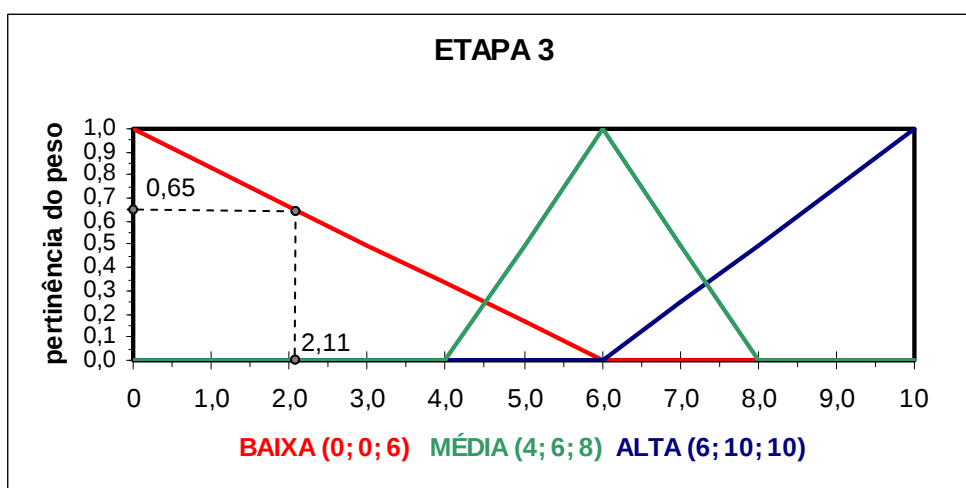


Figura 60 - Avaliação gráfica para a etapa 3 do FMEA da Empresa 1

A Figura 61 apresenta a avaliação gráfica para a etapa 4 do FMEA da Empresa 1. Para este caso a nota atribuída foi de 8,05 que resulta numa pertinência do peso μ é igual a 0,61 para a nota Alta.

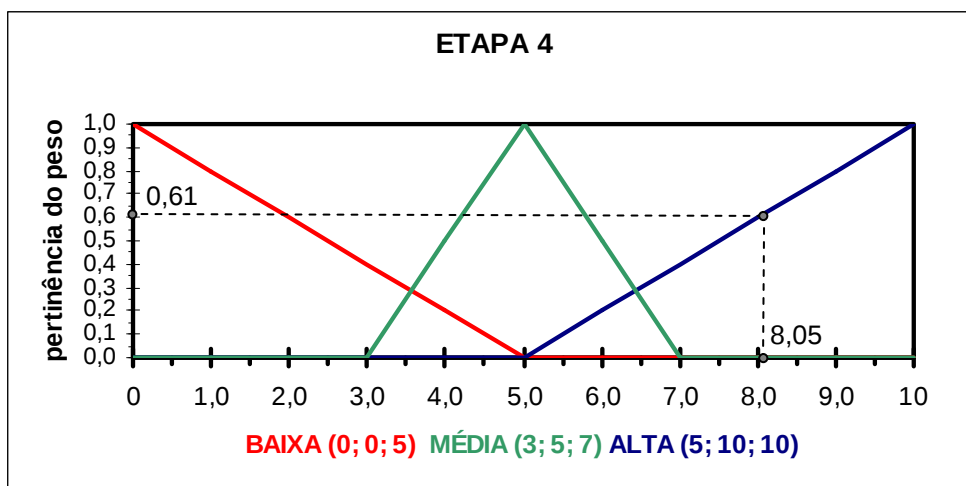


Figura 61 - Avaliação gráfica para a etapa 4 do FMEA da Empresa 1

Como no caso do FMEA da Empresa 1 têm-se duas situações para a etapa 1, e uma situação em mais cada uma das outras três etapas, a união dos conjuntos é formada por duas das oitenta e uma regras apresentadas no Apêndice 1. Para cada combinação é obtido um valor para “ α -cut”, estando este associado a uma resposta positiva ou negativa, ou seja, FMEA aceitável ou não aceitável conforme cada regra. A Tabela 18 demonstra estes valores para o caso do FMEA da Empresa 1.

Tabela 18 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 1

Regras para a avaliação do desempenho - Empresa 1					α - cut	
REGRAS	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4	N. A.	A.
61	BAIXA 0,28	ALTA 1,00	BAIXA 0,65	ALTA 0,61	0,28	-
62	MÉDIA 0,03	ALTA 1,00	BAIXA 0,65	ALTA 0,61	-	0,03

Esta mesma abordagem gráfica foi dada para os FMEAs das demais Empresas. Em cada caso foram obtidas as pertinências dos pesos referentes a cada nota obtida em cada uma das quatro etapas. Os dados de cada FMEA se encaixam em um perfil distinto dentro das regras de combinações e, conseqüentemente, com apontamento de valores de decisão específicos em cada caso. As Tabelas de 19 a 28 apresentam estes valores para os FMEAs das Empresas de 2 a 11 respectivamente. Pode ser observado que o número de regras nem sempre é o mesmo para todos os casos, sendo que, além da Empresa 1, as Empresas 2, 7, 9, e 11 apresentam as duas situações de decisão (Aceitar e Não Aceitar) como variáveis de saída da fuzzificação, sendo possível

identificar a resposta final com a aplicação da desfuzzificação. Já as Empresas 3, 4, 5, 6, 8 e 10 apresentam apenas a variável de saída Aceitar.

Tabela 19 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 2

Regras para a avaliação do desempenho - Empresa 2					α - cut	
REGRAS	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4	N. A.	A.
61	BAIXA 0,88	ALTA 0,80	BAIXA 0,16	ALTA 0,85	0,16	-
70	BAIXA 0,88	ALTA 0,80	MÉDIA 0,52	ALTA 0,85	-	0,52

Tabela 20 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 3

Regras para a avaliação do desempenho - Empresa 3					α - cut	
REGRAS	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4	N. A.	A.
97	BAIXA 0,01	MÉDIA 0,40	MÉDIA 0,76	ALTA 1,00	-	0,01
68	MÉDIA 0,97	MÉDIA 0,40	MÉDIA 0,76	ALTA 1,00	-	0,40
70	BAIXA 0,01	ALTA 0,30	MÉDIA 0,76	ALTA 1,00	-	0,01
71	MÉDIA 0,97	ALTA 0,30	MÉDIA 0,76	ALTA 1,00	-	0,03
76	BAIXA 0,01	MÉDIA 0,40	ALTA 0,12	ALTA 1,00	-	0,01
77	MÉDIA 0,97	MÉDIA 0,40	ALTA 0,12	ALTA 1,00	-	0,12
79	BAIXA 0,01	ALTA 0,30	ALTA 0,12	ALTA 1,00	-	0,01
80	MÉDIA 0,97	ALTA 0,30	ALTA 0,12	ALTA 1,00	-	0,12

Tabela 21 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 4

Regras para a avaliação do desempenho - Empresa 4					α - cut	
REGRAS	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4	N. A.	A.
70	BAIXA 0,23	ALTA 0,80	MÉDIA 0,23	ALTA 1,00	-	0,23
71	MÉDIA 0,20	ALTA 0,80	MÉDIA 0,23	ALTA 1,00	-	0,20
79	BAIXA 0,23	ALTA 0,80	ALTA 0,39	ALTA 1,00	-	0,23
80	MÉDIA 0,20	ALTA 0,80	ALTA 0,39	ALTA 1,00	-	0,20

Tabela 22 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 5

Regras para a avaliação do desempenho - Empresa 5					α - cut	
REGRAS	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4	N. A.	A.
65	MÉDIA 0,85	BAIXA 0,67	MÉDIA 0,46	ALTA 0,61	-	0,46
66	ALTA 0,10	BAIXA 0,67	MÉDIA 0,46	ALTA 0,61	-	0,10
74	MÉDIA 0,85	BAIXA 0,67	ALTA 0,27	ALTA 0,61	-	0,27
75	ALTA 0,10	BAIXA 0,67	ALTA 0,27	ALTA 0,61	-	0,10

Tabela 23 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 6

Regras para a avaliação do desempenho - Empresa 6					α - cut	
REGRAS	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4	N. A.	A.
65	MÉDIA 0,60	BAIXA 0,20	MÉDIA 0,76	ALTA 1,00	-	0,20
66	ALTA 0,10	BAIXA 0,20	MÉDIA 0,76	ALTA 1,00	-	0,10
68	MÉDIA 0,60	MÉDIA 0,41	MÉDIA 0,76	ALTA 1,00	-	0,41
69	ALTA 0,10	MÉDIA 0,41	MÉDIA 0,76	ALTA 1,00	-	0,10
74	MÉDIA 0,60	BAIXA 0,20	ALTA 0,12	ALTA 1,00	-	0,12
75	ALTA 0,10	BAIXA 0,20	ALTA 0,12	ALTA 1,00	-	0,10
77	MÉDIA 0,60	MÉDIA 0,41	ALTA 0,12	ALTA 1,00	-	0,12
78	ALTA 0,10	MÉDIA 0,41	ALTA 0,12	ALTA 1,00	-	0,10

Tabela 24 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 7

Regras para a avaliação do desempenho - Empresa 7					α - cut	
REGRAS	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4	N. A.	A.
25	BAIXA 0,01	ALTA 0,50	ALTA 1,00	BAIXA 0,07	0,01	-
26	MÉDIA 0,97	ALTA 0,50	ALTA 1,00	BAIXA 0,07	-	0,07
52	BAIXA 0,01	ALTA 0,50	ALTA 1,00	MÉDIA 0,82	-	0,01
53	MÉDIA 0,97	ALTA 0,50	ALTA 1,00	MÉDIA 0,82	-	0,50

Tabela 25 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 8

Regras para a avaliação do desempenho - Empresa 8					α - cut	
REGRAS	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4	N. A.	A.
67	BAIXA 0,01	MÉDIA 0,40	MÉDIA 0,76	ALTA 0,61	-	0,01
68	MÉDIA 0,97	MÉDIA 0,40	MÉDIA 0,76	ALTA 0,61	-	0,40
70	BAIXA 0,01	ALTA 0,30	MÉDIA 0,76	ALTA 0,61	-	0,01
71	MÉDIA 0,97	ALTA 0,30	MÉDIA 0,76	ALTA 0,61	-	0,30
76	BAIXA 0,01	MÉDIA 0,40	ALTA 0,12	ALTA 0,61	-	0,01
77	MÉDIA 0,97	MÉDIA 0,40	ALTA 0,12	ALTA 0,61	-	0,12
79	BAIXA 0,01	ALTA 0,30	ALTA 0,12	ALTA 0,61	-	0,01
80	MÉDIA 0,97	ALTA 0,30	ALTA 0,12	ALTA 0,61	-	0,12

Tabela 26 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 9

Regras para a avaliação do desempenho - Empresa 9					α - cut	
REGRAS	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4	N. A.	A.
2	MÉDIA 0,62	BAIXA 0,53	BAIXA 0,16	BAIXA 0,07	0,07	-
3	ALTA 0,25	BAIXA 0,53	BAIXA 0,16	BAIXA 0,07	0,07	-
11	MÉDIA 0,62	BAIXA 0,53	MÉDIA 0,52	BAIXA 0,07	0,07	-
12	ALTA 0,25	BAIXA 0,53	MÉDIA 0,52	BAIXA 0,07	0,07	-
29	MÉDIA 0,62	BAIXA 0,53	BAIXA 0,16	MÉDIA 0,82	0,16	-
30	ALTA 0,25	BAIXA 0,53	BAIXA 0,16	MÉDIA 0,82	0,16	-
38	MÉDIA 0,62	BAIXA 0,53	MÉDIA 0,52	MÉDIA 0,82	-	0,52
39	ALTA 0,25	BAIXA 0,53	MÉDIA 0,52	MÉDIA 0,82	-	0,25

Tabela 27 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 10

Regras para a avaliação do desempenho - Empresa 10					α - cut	
REGRAS	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4	N. A.	A.
71	MÉDIA 0,62	ALTA 0,80	MÉDIA 0,76	ALTA 1,00	-	0,62
72	ALTA 0,25	ALTA 0,80	MÉDIA 0,76	ALTA 1,00	-	0,25
80	MÉDIA 0,06	ALTA 0,80	ALTA 0,12	ALTA 1,00	-	0,12
81	ALTA 0,25	ALTA 0,80	ALTA 0,12	ALTA 1,00	-	0,12

Tabela 28 - Regras e valores de decisão (α -cut) para o FMEA da Empresa 11

Regras para a avaliação do desempenho - Empresa 11					α - cut	
REGRAS	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4	N. A.	A.
64	BAIXA 0,07	BAIXA 0,20	MÉDIA 0,76	ALTA 1,00	0,07	-
65	MÉDIA 0,75	BAIXA 0,20	MÉDIA 0,76	ALTA 1,00	-	0,20
67	BAIXA 0,07	MÉDIA 0,41	MÉDIA 0,76	ALTA 1,00	-	0,07
68	MÉDIA 0,75	MÉDIA 0,41	MÉDIA 0,76	ALTA 1,00	-	0,41
73	BAIXA 0,07	BAIXA 0,20	ALTA 0,12	ALTA 1,00	0,07	-
74	MÉDIA 0,75	BAIXA 0,20	ALTA 0,12	ALTA 1,00	-	0,12
76	BAIXA 0,07	MÉDIA 0,41	ALTA 0,12	ALTA 1,00	-	0,07
77	MÉDIA 0,75	MÉDIA 0,41	ALTA 0,12	ALTA 1,00	-	0,12

Para a desfuzzificação são considerados os maiores valores obtidos para cada variável resposta (α -cut N.A. / α -cut A.) conforme definido na Tabela 29.

Tabela 29 - Maiores valores das variáveis resposta para cada FMEA

FMEA	α - cut N.A.	α - cut A.
Empresa 1	0,28	0,03
Empresa 2	0,16	0,52
Empresa 3	-	0,40
Empresa 4	-	0,23
Empresa 5	-	0,46
Empresa 6	-	0,41
Empresa 7	0,01	0,50
Empresa 8	-	0,40
Empresa 9	0,16	0,52
Empresa 10	-	0,62
Empresa 11	0,07	0,41

A análise destes resultados foi realizada pela interpretação destas saídas do modelo lingüístico *fuzzy* através do método de desfuzzificação do baricentro conforme apresentado no Capítulo 3. O gráfico da Figura 62 indica a regra adotada como critério de aceitação dos FMEAs em estudo, na qual uma pontuação inferior a 60% indica que o FMEA não deve ser aceito, ao passo que o FMEA deve ser aceito se a pontuação for maior que 60%. Esta abordagem foi definida com base no valor médio entre as funções de pertinências apresentadas na Figura 53, sendo possível identificar os termos lingüísticos selecionados.

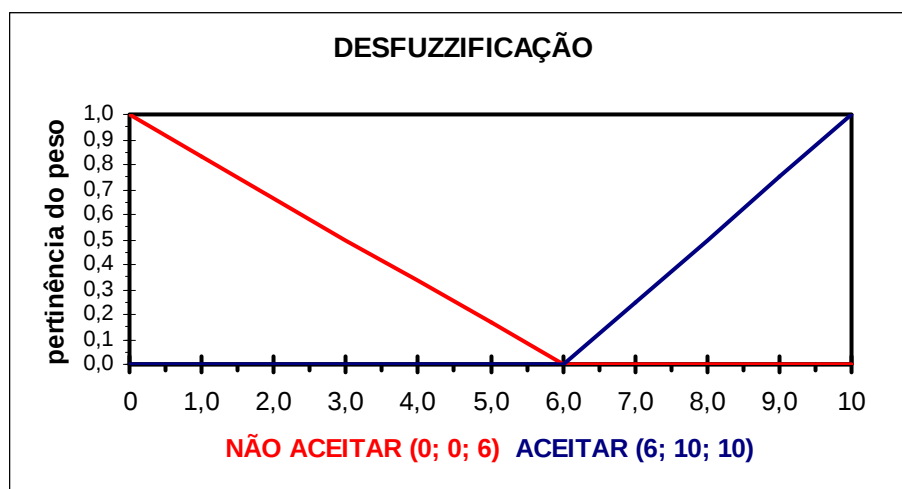


Figura 62 - Gráfico do critério de aceitação para a avaliação dos FMEAs

Para a obtenção do valor da área foram utilizados cálculos simples de áreas de retângulos, triângulos e trapézios, o que reduz muito o custo computacional do sistema. Este valor é calculado sobre a figura geométrica formada levando-se em conta o grau de pertinência que vai definir a altura da figura. Para o FMEA da Empresa 1, a pertinência do peso para a condição aceitável (α -cut A.) de 0,03 resulta no trapézio à direita do gráfico da Figura 63. Já a pertinência do peso para a condição não aceitável (α -cut N.A) de 0,28 resulta no trapézio à esquerda do mesmo gráfico.

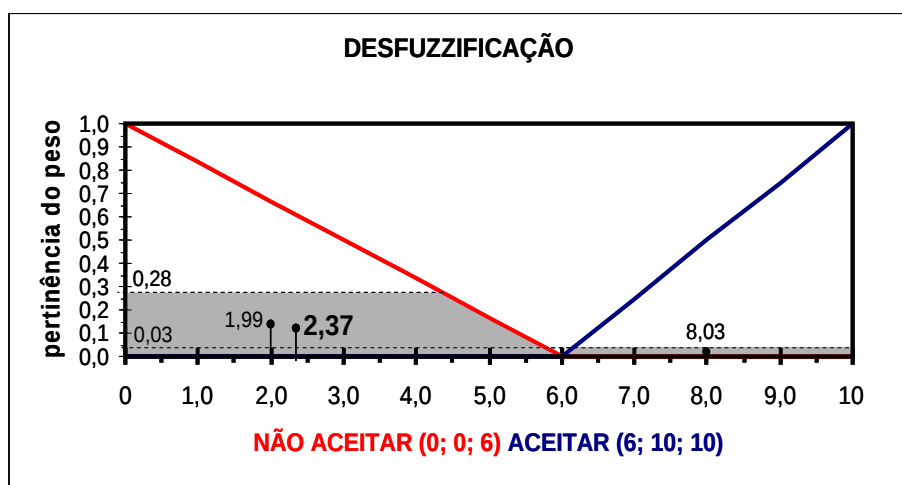


Figura 63 - Gráfico da desfuzzificação para o FMEA da Empresa 1

O valor final de 2,37 resulta da média dos valores 1,99 e 0,83 referentes à coordenada em X do ponto do baricentro dos trapézios da condição de não aceitar e da condição de aceitar respectivamente. Esta nota final de 2,37 para a avaliação do FMEA da Empresa 1 indica que este FMEA não foi aceito conforme os padrões propostos neste estudo. A mesma abordagem foi dada para os FMEAs das demais empresas, A Tabela 30 apresenta o resultado final da aplicação dos conjuntos *fuzzy* para todos os onze FMEAs e seus respectivos laudos.

Tabela 30 - Pontuação final de cada FMEA e respectivos laudos

FMEA	Nota Final	Laudos
Empresa 1	0,237	Não Aceito
Empresa 2	0,560	Não Aceito
Empresa 3	0,737	Aceito
Empresa 4	0,722	Aceito
Empresa 5	0,741	Aceito
Empresa 6	0,737	Aceito
Empresa 7	0,727	Aceito
Empresa 8	0,737	Aceito
Empresa 9	0,560	Não Aceito
Empresa 10	0,753	Aceito
Empresa 11	0,627	Aceito

Com a parametrização apresentada, três dos onze FMEAs, mais especificamente os das Empresas 1, 2 e 9, ficaram com a nota final menor que seis, enquadrando-se na condição de não aceitável. O FMEA da Empresa 1 teve um baixo desempenho em sua avaliação principalmente pelos valores obtidos na etapa 3, onde a falta de controle preventivo atuando na causa e também o fato de não apresentar controle preventivo para algumas análises comprometeram sua aceitação.

Já o FMEA da Empresa 2 teve como maior peso para a não aceitação o alto índice de irregularidades ocorridas na etapa 1, onde das sete irregularidades identificadas para esta etapa, este FMEA apresentou a ocorrência de seis, o que resultou num desempenho de 0,083. No caso da Empresa 9, a ocorrência de causa não ligada ao modo de falha bem como a variação da pontuação de ocorrência para uma mesma causa implicaram no pior desempenho avaliado para a etapa 2 com a pontuação igual a 0,280 que teve grande contribuição para a não aceitação do FMEA.

Nota-se que para estes três casos não foi só o baixo desempenho em uma das etapas que implicou na não aceitação, mas a associação destes citados com as outras etapas não tão ruins, porém também não tão boas acarretaram na não aceitação. O pior desempenho apontado para a etapa 2 foi no FMEA da Empresa 5 onde se obteve a pontuação de 0,201. Porém as notas de 0,730; 0,649 e 1,00 que correspondem

respectivamente às etapas 1, 3 e 4, garantiram uma pontuação final de 0,741 após a aplicação do modelo, tendo como resposta a aceitação do FMEA.

Mesmo sendo a etapa 4 tida como a de menor importância, observa-se que cinco dos oito FMEAs aceitos tiveram um desempenho de 100% nesta etapa não apresentando nenhum tipo de irregularidade, o que, associados aos bons desempenhos também apresentados nas demais etapas proporcionou um resultado final favorável para tais avaliações.

Numa eventual necessidade de maior rigor na avaliação da aplicação do FMEA, existe a possibilidade de variação dos níveis de aceitação através de nova atribuição da aplicação das regras. No apêndice 2 está apresentada a relação destas novas regras onde são aceitáveis somente os FMEAs que não apresentam nota no nível de avaliação baixa em nenhuma das quatro etapas. A Tabela 31 apresenta o resultado final da aplicação dos conjuntos *fuzzy* nesta nova configuração de regras em termos de nota final e laudo de aceitação.

Tabela 31 - Pontuação final de cada FMEA e respectivos laudos

FMEA	Nota Final	Laudo
Empresa 1	0,199	Não Aceito
Empresa 2	0,166	Não Aceito
Empresa 3	0,704	Aceito
Empresa 4	0,401	Não Aceito
Empresa 5	0,169	Não Aceito
Empresa 6	0,504	Não Aceito
Empresa 7	0,643	Aceito
Empresa 8	0,717	Aceito
Empresa 9	0,166	Não Aceito
Empresa 10	0,753	Aceito
Empresa 11	0,571	Não Aceito

Nesta nova aplicação todos os FMEAs apresentaram notas inferiores apenas às obtidas na primeira abordagem, sendo que apenas quatro apresentaram notas acima de seis e obtiveram o laudo final de aceitação.

5 CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O objetivo da pesquisa de mestrado foi realizar uma avaliação da utilização de FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) de processo em empresas do segmento automotivo, para tanto foram aplicados os conceitos relacionados à metodologia de auxílio à decisão. Para o atendimento do objetivo geral, surgem os objetivos específicos, desenvolvimento do embasamento teórico sobre a aplicação do FMEA de processo, levantamento das irregularidades de sua aplicação em algumas organizações, definição da hierarquia entre as irregularidades identificadas e atribuição de notas para os formulários de FMEA analisados.

Assim, no Capítulo 2, está apresentado um embasamento teórico detalhado sobre o FMEA de processo. Foi possível apresentar uma abordagem passo a passo da aplicação do FMEA pelo sequenciamento em quatro etapas. A etapa 1 consiste no preenchimento das colunas item / função, modo de falha potencial, efeito potencial da falha, severidade e classificação; a etapa 2 consiste no preenchimento da coluna causa e mecanismo potencial de falha e também da coluna ocorrência; a etapa 3 consiste no preenchimento das duas colunas de controle, a de controle preventivo e a de controle detectivo, além do preenchimento dos valores da coluna de detecção; e a etapa 4 aborda o preenchimento da coluna do número de prioridade de risco (NPR) bem como as colunas relativas às ações recomendadas. Diferentes referências estão apresentadas com diferentes abordagens sobre os critérios de pontuação de severidade, ocorrência e detecção; sendo que a proposta considerada mais adequada foi a abordagem apresentada por Palady (1997) que serviu de base para a sequência do trabalho.

No Capítulo 4 encontra-se apresentada a análise de onze formulários de FMEA de Processo de empresas de diferentes ramos produtivos e pertencentes ao segmento automotivo, na qual foram levantados alguns fatos específicos na aplicação do FMEA e, com referência no embasamento teórico, estes fatos foram definidos como irregularidades na aplicação do FMEA.

Neste mesmo Capítulo 4 apresenta-se a aplicação do método AHP, realizada paralelamente nas quatro etapas de execução do FMEA para a hierarquização das irregularidades identificadas. Para cada categoria foram elaboradas as matrizes de comparação paritária das irregularidades. As prioridades foram estabelecidas pela definição do grau de importância do relacionamento de cada fator com o fator comparado através da aplicação da Escala Fundamental de Saaty, sendo a gravidade da ocorrência das irregularidades considerada como o grau de importância das comparações. Para cada julgamento foi realizada a medição da coerência, e para as quatro matrizes o valor obtido para a razão de coerência indicou que estas apresentaram todos os julgamentos coerentes entre si. Assim, foi concretizada a hierarquização das irregularidades identificadas por etapa de realização do FMEA pela determinação da prioridade relativa de cada irregularidade.

Ainda no Capítulo 4, são apresentadas as notas referentes à avaliação de cada etapa. Cada FMEA obteve uma distribuição bem particular das irregularidades, onde de acordo com a prioridade relativa determinada pela aplicação do AHP, possui quatro notas que retratam o desempenho da aplicação do FMEA em cada uma das quatro etapas. O fato da relação de dependência entre as etapas foi determinante para a aplicação dos conjuntos *fuzzy*, uma vez que a partir desta análise a etapa 1 foi definida como mais importante, as etapas 2 e 3 como de importância moderada e a etapa 4 como de menor importância. Desta forma, para cada etapa foram definidas três funções de pertinência representadas pelos termos lingüísticos Baixa, Média e Alta, sendo que os valores destas variou de acordo com a importância de cada etapa.

Para cada FMEA, cada nota atribuída através da ocorrência da irregularidade associada ao peso definido na aplicação do método AHP foi lançada no gráfico da função de pertinência *fuzzy* para cada etapa, obtendo a pertinência do peso para cada grau de avaliação em que a nota se relaciona conforme apresentado em 4.4. A combinação entre as quatro etapas e as três funções de pertinência resultou na aplicação de um algoritmo de controle formado por oitenta e uma regras. O número de regras aplicadas a cada caso está relacionado ao tipo de combinação dos valores de decisão. Com a aplicação da desfuzzificação pelo método do baricentro foi concluída a avaliação do desempenho dos FMEAs.

5.2 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Este trabalho apresenta contribuições em duas áreas distintas: Auxílio à Decisão e Gestão da Qualidade. Com relação ao Auxílio à Decisão, no Capítulo 3 têm-se uma apresentação dos conceitos de decisões com múltiplos critérios com foco no método AHP além de uma apresentação didática detalhada sobre sistemas especialistas em um exemplo de problema decisório relacionado à pesquisa de satisfação de clientes.

Contudo, as principais contribuições do trabalho são relacionadas à Gestão da Qualidade, especificamente nas tratativas de prevenção de falhas em processos de manufatura. Uma contribuição nesta área está na apresentação (Capítulo 2) de um embasamento teórico detalhado sobre sua aplicação do FMEA de processo com os passos divididos em quatro etapas de execução. Um aspecto relevante neste trabalho consiste na análise crítica da aplicação de FMEA de Processo em empresas pertencentes ao segmento automotivo, que resultou na identificação das irregularidades ocorrentes na aplicação do FMEA de processo que prejudicam o seu correto funcionamento conforme apresentado no Capítulo 4.

A divisão do FMEA em quatro etapas de execução, a hierarquização das irregularidades pela aplicação do método AHP, a atribuição de notas às etapas e a aplicação dos sistemas *fuzzy* para a avaliação e posterior classificação dos formulários de FMEA em estudo formam os aspectos inéditos abordados nesta pesquisa.

5.3 PROPOSTAS PARA NOVAS PESQUISAS

Após a realização deste estudo de caso, foi possível atribuir notas aos formulários de FMEA de processo a partir da identificação de irregularidades em sua aplicação. Uma proposta para estudo futuro é a aplicação dos conceitos apresentados para um estudo que envolva fatores de custos da qualidade, buscando a medição do desempenho da aplicação do FMEA de processo em termos eficácia e eficiência.

Outro tema para estudos posteriores trata da avaliação da aplicação do FMEA de processo integrada a outras técnicas, como por exemplo CEP e QFD. Garcia (2000) propõe uma aplicação em paralelo entre o CEP e o FMEA, na qual tais técnicas devem ser usadas de forma permanente no processo, sendo que o CEP tem a função de

assegurar o monitoramento das variáveis e atributos envolvidos e a ação continuada sobre as causas de variabilidade e o FMEA acompanha todas as modificações no processo, e atuando sempre que os riscos envolvidos forem elevados. Fernandes (2004) propõe uma integração do FMEA com o QFD, onde o FMEA possibilita a obtenção da probabilidade de ocorrência e detecção de um determinado modo de falha e o QFD identifica com maior precisão quais os requisitos, necessidades e expectativas do cliente são afetadas pelo modo de falha. Assim, propõe-se a aplicação da metodologia de auxílio à decisão para a avaliação destas propostas de integração de técnicas de gestão da qualidade.

Referências bibliográficas

- AGUIAR, D. C. **Pesquisa de satisfação de clientes com aplicação de metodologia de auxílio à decisão com conjuntos Fuzzy**. II UNEM – Workshop Cooperação Universidade Empresa. Taubaté, SP. Set. 2006.
- ALVES FILHO, A. G. **O poder de compra**. Revista Pesquisa Fapesp Ciência e Tecnologia no Brasil. Edição 75, mai. 2002. Disponível em: <<http://www.revistapesquisa.fapesp.br/?art=1816ebd=1epg=1elg=>>>. Acesso em jan. 2006.
- ANDRADE, M. R. S.; TURRIONI, J. B. **Uma metodologia de análise dos aspectos e impactos ambientais através da utilização do FMEA**. XX Encontro Nacional de Engenharia de Produção - São Paulo, SP. Out., 2000.
- BAYAZIT, O. **Use of AHP in decisions-making for flexible manufacturing systems**. Journal of Manufacturing Technology Management, v. 16, nº 7, p. 808 - 819, 2005.
- BEN, F. **Utilização do método AHP em decisões de investimento ambiental**. XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Fortaleza, CE. Out. 2006.
- BRAGLIA, M.; CARMIGNANI, G.; FROSOLINI, M. **AHP-based evaluation of CMMS software**. Diário de Administração de Tecnologia Industrial, v. 17, nº 5, p. 585 - 602, 2006.
- CAMPOS FILHO, P. **Método de apoio à decisão na verificação da sustentabilidade de uma unidade de conservação, usando lógica fuzzy**. 2004. 211p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- CARNEVALLI, J. A.; MIGUEL, P. A. C.; CALARGE, F. A. **Análise de dados da literatura sobre a implantação de QFD utilizando o método AHP**. XI SIMPEP, Bauru, SP. Out. 2004.
- CASSANELLI, G.; MURA, G.; FANTNI, F.; VANZI, M.; PLANO, B. **Failure Analysis-assisted FMEA**. Microelectronics Reability, v. 46, p. 1795-1799, 2006.
- CHANG, C. L.; LIU, P. H.; WEI, C. C. **Failure mode and effects analysis using grey theory**. Integrated Manufacturing systems, v. 12, p. 221-226, 2001.
- CRAIG, D.J. **Stop depending on inspection**. Quality Process, p 39-44, Jul. 2004.
- ELLIS, M. E. **FMEA as a gap analysis / transition Tool (ISO 9001:2000 / TS16949:2002)**. Quality Congress. ASQ's Annual Congress Proceedings, v. 58, p. 43-44, 2004.
- EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION. **ECSS-Q-30-02A: Failure mode, effects and criticality analysis (FMECA)**. Netherlands, 2001. Disponível em <<http://www-corot.obspm.fr/COROT-ETC/Files/ECSS/ECSS-Q-30->

02A%20Failure%20modes,%20effect%20and%20criticality%20analysis%20FMECA-7%20September%202001.pdf> Acesso em 24 abril 2007.

FERNANDES, J. M. R.; REBELATO, M. G. **Proposta de um método para integração entre QFD e FMEA**. Gestão e Produção, v. 13, n. 2, p. 245-259, mai.-ago. 2006.

FERNANDES, J. M. R. **Proposição de abordagem integrada de métodos da qualidade baseada no FMEA**. 2005. 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Pontífica Universidade Católica do Paraná, Curitiba, PR, 2005.

FORMAN, E.; SELLY, M. (2001) **Decisions by objectives**. Expert Choice, Inc. Disponível em <<http://www.expertchoice.com/service/books/dbo.html>>, acesso em 26 novembro 2006.

GARCIA, M. D. **Uso integrado das técnicas de HACCP, CEP e FMEA**. 2000. 128p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande Do Sul - Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS, 2000.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4ª Edição. Editora Atlas S.A. São Paulo, 2002.

GONZALEZ, R. V. D. **Análise exploratória da prática da melhoria contínua em empresas fornecedoras do setor automobilístico e de bens de capital certificadas pela norma ISO 9001:2000**. 2006. 213p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2006.

HELMAN, H, ANDERY, P. R. P. **Análise de falhas: aplicação dos métodos FMEA e FTA**. Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte, 1995.

HENNEMANN, F. A. **Uma abordagem híbrida para sistemas de apoio à decisão utilizando redes de pretri e técnicas de simulação**. 2004. 172p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2004.

HORITA, F. **Trabalho de FMEA**. Disponível em: <www.fge.if.usp.br/~fhorita/FMEA.htm>. Acesso em: 14 Abril 2006.

INSTITUTO DA QUALIDADE AUTOMOTIVA. **Análise de Modo e Efeito de Falha Potencial: FMEA**: Terceira Edição. Manuais QS-9000. São Paulo, 2001.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION. Technical Specification 16949. **Quality Management Systems – Particular requirements for the application of ISO 9001:2000 for automotive production and relevant service part organizations** – Second Edition, 2002.

KINOSHITA, E.; SEKITANI, K.; SHI, J. **Mathematical properties of dominant AHP concurrent convergence method**. XI ISAHP. Berne, Switzerland, Ago, 2001.

LAYZELL, J; LEDBETTER, S. **FMEA applied to cladding systems: reducing the risk of failure**. Building Research & Information, London, v. 26, n. 6, p. 351-357, 1998.

- LEAL, F.; PINHO, A. F.; ALMEIDA, D. A. **Análise de falhas através da aplicação do FMEA e da teoria Grey**. XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção - Porto Alegre, RS. out. - nov. 2005.
- LEE, S. M.; LIN, K. L.; GUPTA, S. **Economic decision making using fuzzy numbers**. Second World Conference on POM and 15th Annual POM Conference, Cancun, Mexico, Abr – Mai. 2004.
- MALUTTA, C. **Método de apoio à tomada de decisão sobre a adequação de aterros sanitários utilizando a lógica fuzzy**. 2004. 221p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2004.
- MARCONCIN, J. C. **Melhorias no desenvolvimento de produtos de uma empresa de manufatura de produtos eletrônicos**. 2004, 135p. Dissertação (Mestrado profissionalizante em engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS, 2004.
- MATOS, R. B. **Indicadores de desempenho para o beneficiamento de madeira serrada em empresas de pequeno porte: Um estudo de caso**. 2004. 100p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP, 2004.
- MONTEVECHI, J. A. B.; PAMPLONA, E. O. **Análise hierárquica em análise de investimentos, looking for a paradigm shift**. XVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Porto Alegre, RS. Out. 1996.
- MORÉ, J. D. **Aplicação da lógica fuzzy na avaliação da confiabilidade humana nos ensaios não destrutivos por ultra-som**. 2004. 218p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2004.
- MORITA, H. **Metodologias para estruturação e avaliação da decisão nas organizações: uma pesquisa**, In: SHIMIZU, T., *Decisão nas Organizações: introdução aos problemas de decisão encontrados nas organizações e nos sistemas de apoio à decisão*, Atlas, p.286-293, São Paulo, SP, 2001
- NUNES JUNIOR, L. F. **Tomada de decisão com múltiplos critérios: Pesquisa-ação sobre o método AHP em pequenas empresas**. 2006, 128p. Dissertação (Mestrado em Gestão e Desenvolvimento Regional) - Universidade de Taubaté - Departamento de Economia, Contabilidade e Administração. Taubaté, SP, 2006.
- PALADY, P. **FMEA: Análise dos Modos de Falha e Efeitos. Prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram**. São Paulo: IMAN, 1997.
- PEREIRA, G. M.; GEIGER, A. **Complexidade do produto e volume de produção como determinantes da estratégia de desenvolvimento de fornecedores automotivos**. *Gestão e Produção*. V.12, n2, p.191-2001, mai-ago.2005.

- POLLOCK, S. **Create a Simple Framework To Valide FMEA Performance**. Six Sigma Forum Magazine, USA, 2005.
- PUENTE, J.; PINO, R.; PRIORE, P.; FOUENTE, D. L. **A decision support system for applying failure mode and effects analysis**. Intenational Journal of Quality e Reability Management, Bradford, v. 19, n. 2, p. 137-151, 2002.
- REID, R. D. **FMEA - Something old, something New**. Quality Progress, v. 38, p. 90 - 93, 2005.
- RHEE, S. J.; ISHII, K. **Using cost based FMEA to enhance reability and serviceability**. Advanced Engineering Informatics, v. 17, p. 179-188, 2003.
- ROTONDARO, R. G. **SFMEA: Análise do efeito e modo de falha em serviços - aplicando técnicas de prevenção na melhoria de serviços**. Revista Produção, v. 12, n. 2, p. 54-62, 2002.
- SAATY, T. L. **Analytic Hierarchy Process, vol. 2 Decision Making for Leaders**. Vol. II of the AHP Series Thomas L. Saaty, 315 pp., RWS Publ. (new ed.), 2001.
- SALOMON, V. A. P. **Desempenho da Modelagem do Auxílio à Decisão por Múltiplos Critérios na Análise do Planejamento e Controle da Produção**. 2004, Tese (Doutor em Engenharia), Poli/USP, São Paulo, SP, 2004.
- SCHMIDT, A. M. A. **Processo de apoio à tomada de decisão abordagens: AHP e Macbeth**. 1995. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1995.
- SELLITTO, M. A. **Inteligência artificial: uma aplicação em uma indústria de processo contínuo**. Revista Gestão e Produção. São Carlos, v.9, n.3, p.363-376, dez. 2002.
- SHARMA, R.K.; KUMAR, D.; KUMAR, P. **Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling**. Intenational Journal of Quality e Reability Management, Bradford, v. 22, n. 9, p. 986-1004, 2005.
- SHIMIZU, T.; **Decisão nas Organizações: introdução aos problemas de decisão encontrados nas organizações e nos sistemas de apoio à decisão**. Atlas, São Paulo, SP, 2001.
- SILVA, C. E. S.; ANTONIETTI, L. E. **Análise específica das dificuldades de implementação do FMEA em uma indústria mecânica de autopeças**. 4º CBGPD. Gramado, RS. Out. 2003.
- SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de Dissertação**. Universidade Federal de Santa Catarina. 4. ed., Florianópolis, SC, 2004.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 2 Ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **ARP 5580: Recommended Failure Modes and**

Effects Analysis (FMEA) Practices for Non-Automobile. USA, 2001.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **J1739: Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA), Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA), and Potential Failure Mode and Effects Analysis for Machinery (Machinery FMEA).** USA, 2002.

STAMATIS, D.H. **Failure Mode and Effect Analysis, FMEA from Theory to Execution.** ASQC Quality Press, Milwaukee, Wisconsin, USA, First Edition, 1995.

TAY, K. M., LIM, C. P. **Fuzzy FMEA with a guided rules reduction system for prioritization of failures.** International Journal of Quality e Reability Management, Bradford, v. 23, n. 8, p. 1047-1066, 2006.

TENG, S.G., HO, S.M., SHUMAR, D., LIU, P.C. **Implementing FMEA in a collaborative supply chain environment.** International Journal of Quality e Reability Management, Bradford, v. 23, n. 2, p. 179-196, 2006.

TERNINKO, J. **Reability / Mistake-proofing using failure node and effect analysis (FMEA).** Quality Congress. ASQ's Annual Congress Proceedings, v. 57, p. 515 - 526, 2003.

TOZZI, A. R. **Desenvolvimento de um programa de verificação de processo de lançamento de cabos com o auxílio da FMEA.** 2004., 84p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande Do Sul - Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS, 2004.

USA DEPARTMENT OF DEFENSE. MIL-STD-1669A **Military standards procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis.** United States of America, 1980
Disponível em: < http://www.uscg.mil/hq/gm/risk/E-Guidelines/RBDM/html/vol4/Volume4/Tool-spec_Rec/FMEA/MIL-STD-1629A.pdf>. Acessado em: 24 abril 2007.

VARGAS, L. G. **An overview of the Analytic Hierarchy Process and its applications.** European Journal of Operational Research, Amsterdam, v.48, n.1, p.2- 8, Sep. 1990.

VOSS, C., TSIKRIKTSIS, N. FROHLICH, M. **Case reseach in operations management.** International Journal of Operations & Production Management, v. 22, nº. 2, p. 195 - 219, 2002.

WANG, L., CHU, J., WU, J. **Selection of optimum maintence strategies based on a fuzzy analitic hierarchy process.** International Journal os Production Economics, n. 107, p. 151-163, 2007.

ANEXO A – FMEAs das empresas analisadas

ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS FMEA DE PROCESSO																
Item / Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(S) Potencial(S) de Falha	S E V E	L A S	Causa Potencial (6M) Mecanismos	O C O R	Controle Preventivo Atual	Controle Detecção Atual	D E T C	Ações Recomendadas	Responsabilidade e pelas ações recomendadas e prazos envolvidos	Ações Resultantes				
												Ação Tomada	S E V E	O C O R	D E T C	N P R
Receber Matéria-Prima Operação Padrão	Bitola do material menor que o especificado	Não obtenção de bitola uniforme na operação de treliça	1.2	2	Falha na verificação da bitola no recebimento do material	2	-	3.2 Conforme ILB-019	3.3	3	12	Nenhuma	4.4			
	Composição química do material fora de especificação	Afeta a resistência do material	7		Falha na análise química pelo Laboratório	2	-	Conforme ILB-008 (Skip Lote)	5	O histórico demonstra que as rejeições são raras	Laboratório	7	2	2	28	
	Estrutura fora de especificação	Dificulta conformação do material	6		Falhas nas análises físico/metrológicas	2	-	Conforme ILB-008	2	24	Nenhuma					
Preparar Matéria-Prima (Decapar e Fostatizar) Operação: 10-1120	Decapagem deficiente (presença de carepa no material)	Não permite fostatização adequada	2		Interferência no banho decapante	4	Análise diária do banho pelo laboratório	-	2	16	Nenhuma					
	Fostatização deficiente	Dificulta estampagem	3	1.6	Ineficiência do banho decapante	4	banhos decapante e fostato pelo	-	2	24	Nenhuma					
	Diâmetro do material treliado fora da medida especificada	Produtos estampados fora das medidas especificadas	3	1.3	Fleira fora de medida	2	Controle das fleiras pela ferramenta	Controle pelo Operador	2	12	Nenhuma					
Estampar Automático Conformar produto (semi-acabado) Operação: 20-1220	Aspectos visuais	defeitos superficiais na ferramenta	2		Desgaste do ferramental	2	-	Inspeção visual	3	12	Nenhuma					
	Peças diferentes	Problema na montagem da contra-peça	8		Falha do operador na separação das peças	2	Identificação do RIR e corrida do material	Etiquetas de identificação em cada caçamba	2	32	Nenhuma					
	Trincas e defeitos superficiais	Resistência do produto e quebra	6		Material com dobras de laminação e riscos de trelição	3	Controle pelo operador	3.1 Inspeção visual	5	90	Nenhuma					

Ilustração das irregularidades encontradas no FMEA da Empresa 1

ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS																	
FMEA DE PROCESSO																	
Item / Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(S) Potencia(S) de Falha	S E V E	C L A S	Causa Potencial (6M) Mecanismos	O C O R	Controle Preventivo Atual	Controle Detecção Atual	D E T C	N P R	Ações Recomendadas	Responsabilidade e pelas ações recomendadas e prazos envolvidos	Ações Resultantes				
													Ação Tomada	S E V E	O C O R	D E T C	N P R
Processos de estampagem a frio de parafusos, pinos e rebites	Falha nas especificações dos requisitos de estampagem	Parada de máquina	1.7	8	Falta de especificações e requisitos	2	Instruções para emissão das ordens de produção	-----	2	32							
					Especificações emitidas com falhas	2	Emissão de desenhos e especificações	-----	2	32							
	Irregularidades na decapagem da matéria-prima	Parada de máquina e desgaste de ferramental	1.2	2	Aderência irregular na camada de fosfato	2	Inspeção de processo para decapagem	-----	2	8							
	Aspectos visuais	Equipamento mal regulado	1.1	3	Falha do operador	2	-----	Inspeção de processo	3.2	3	12						
	Estampagem de peça com material errado	Rejeição das peças na inspeção final	1.3	8	Falha na inspeção de processo	2	-----	Inspeção de processo		3	48						
Tratamento térmico	Mistura de peças com corridas diferentes	Tratamento térmico	1.4	8	Falha na separação das peças na troca de prensagem	2	-----	Inspeção de processo		3	48						
	Resistência à Tração e Dureza fora do especificado	Piéis não atendem aos requisitos de projeto	1.5	10	Tempo de passagem no forno	4	Parâmetros de regulação dos fornos	Inspeção de hora em hora (medição da dureza)		2	80	4.3	Aplicação de temporizador automático				

Ilustração das irregularidades encontradas no FMEA da Empresa 2

ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS																	
FMEA DE PROCESSO																	
Item / Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(S) Potencia(S) de Falha	S E V E	C L A S	Causa Potencial (6M) Mecanismos	O C O R	Controle Preventivo Atual	Controle Detecção Atual	D E T C	N P R	Ações Recomendadas	Responsabilidade e pelas ações recomendadas e prazos envolvidos	Ações Resultantes				
													Ação Tomada	S E V E	O C O R	N P R	
Receber Matéria - Prima, inspecionar e liberar para uso	Tamanho de grão fora do especificado	Dificulta estampagem causando desgaste no ferramental	6		Tratamento térmico inadequado	3	Programação e controle de ciclo	Inspeção de recebimento (Skip Lote)	2	36	Nenhuma						
	Composição química fora do especificado	Pode alterar a temperabilidade e a dureza final	8		Erro na dosagem dos elementos químicos	2	Análise química prévia	Inspeção de recebimento (Skip Lote)	5	80	Nenhuma						
	Trincas e / ou dobras fora do especificado	Trincas abertas propagadas na estampagem	5		Defeitos de laminação	3	Cuidados nos parâmetros do processo de laminação	Inspeção de recebimento (Skip Lote)	5	75	Nenhuma						
Armazenar Matéria Prima	Mistura de Matéria Prima no estoque	Produto estampado com material errado	7		Falta de identificação / estoque em local não apropriado	2	Verificação pelo operador	Inspeção conforme instrução de trabalho	3	42	Nenhuma						
Estampar peça	Diâmetro do corpo maior que o especificado	Montagem	7		Ferramenta de estampagem fora do especificado	3	Inspeção do ferramental pela instrução de trabalho	Paquímetro	2	42	Nenhuma						
	Altura da cabeça maior que o especificado	Montagem	7		Erro na preparação da máquina de estampagem	3	Instrução para preparação da máquina	Paquímetro	2	42	Nenhuma						
	Comprimento total maior que o especificado	Folga na fixação da peça	5		Erro na preparação da máquina de estampagem	2	Instrução para preparação da máquina	Paquímetro	2	20	Nenhuma						

Ilustração das irregularidades encontradas no FMEA da Empresa 3

ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS													
FMEA DE PROCESSO													
Item / Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(S) Potenciais de Falha	SEVE	CLAS	Causa Potencial (6M) Mecanismos	OCOR	Controle Preventivo Atual	Controle Detecção Atual	DET	NPR	Ações Recomendadas	Responsabilidade e pelas ações recomendadas e prazos envolvidos	Ações Resultantes
Conformar (pastilhas) Inspeção - Conformação	Chave	Espana no dispositivo de aplicação	6		Set Up de máquina com 3ª matriz com chave menor	2	Liberação do Set Up	Inspeção dimensional do Set Up de máquina	3	36	-----	-----	S O D N E C E P V O T R E R C .
	Furo	Quebra de macho no rosqueamento / rosca apertada e arrancada	6	*	Desgaste do pino de furo	2	Uso de calibrador tampão P/NP	Carta de Atributos	3	36	-----	-----	
	Furo	Alarga furo	7	*	Ponta do punção maior	2	Uso de calibrador tampão P/NP	Carta de Atributos	3	42	-----	-----	
Rosquear peças	Rosca folgada	Rejeição de peças na inspeção final	7	*	Dimensional do macho acima do padrão	3	liberação de Set Up	Carta de atributos	2	42			
	Rosca apertada	Rejeição de peças na inspeção final	7	*	Operador não afiou o macho	2	Uso de calibrador tampão para furo e rosca	Carta de atributos	2	28			
	Peças sem rosca	Inoperante	7	*	Falta de tampas de proteção nas caixas de saída	2	Uso de calibrador tampão para furo e rosca	Carta de atributos	2	28			

Ilustração das irregularidades encontradas no FMEA da Empresa 4

ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS																
FMEA DE PROCESSO																
Item / Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(S) Potencia(S) de Falha	S E V	C L A S	Causa Potencial (6M) Mecanismos	O C R	Controle Preventivo Atual	Controle Detecção Atual	D E T C	N P R	Ações Recomendadas	Responsabilidade e pelas ações recomendadas e prazos envolvidos	Ações Resultantes			
													Ação Tomada	S	O	N
1.2	Recebimento de Matéria Prima	Diâmetro externo maior	7	2.1	Material fora do especificado	3	-	Inspeção de recebimento	2	42						
		Diâmetro externo menor	7		Material fora do especificado	3	-	Inspeção de recebimento	2	42						
Acondicionam	Troca de material	Peças produzidas com material incorreto	8	1.6	Identificação incorreta	3	Ordem de compra	Almoxarifado	2	48						
Usinar perfis	Comprimento maior	Retrabalhar	7		Quebra da pastilha por mau uso	2.2	Plano de montagem do Set Up	Inspeção de Processo	2	42						
	Comprimento menor	Refugo	7		O material não desliza por falta de pressão	2	Plano de montagem do Set Up	Inspeção de Processo	2	28						
Acondicionam	Peças danificadas	Envio de peças não conforme ao cliente	7		Manuseio inadequado	1	20 peças na embalagem 3035	Inspeção Final	2	14						

Ilustração das irregularidades encontradas no FMEA da Empresa 5

ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS																
FMEA DE PROCESSO																
Item / Função	Modo de Falha de Falha Potencial	Efeito(S) Potencia(S) de Falha	S E V E .	C L A S .	Causa Potencial (6M) Mecanismos	O C O R	Controle Preventivo Atual	Controle Detecção Atual	D E T C	Ações Recomendadas	Responsabilidade e pelas ações recomendadas e prazos envolvidos	Ações Resultantes				
												Ação Tomada	S E V E .	O C O R	D E T C	N P R
Armazenagem de matéria-prima	Empenamento	Não permite próxima operação	7		Excesso de chapas no empilhamento	2	3.1 treinamento on the job do pessoal de carga e descarga	3.4	4	Próximas operações	Nenhuma ação necessária					
	Oxidação	Produção de peças oxidadas	7		Armazenagem no tempo	2	Todo material é recolhido para locais cobertos		4	Próximas operações	Nenhuma ação necessária					
Dobrar	Abertura Maior	Não permite montagem	6		Falta de pressão	2	Liberação de Set Up Conforme carta de controle		4	Inspeção no processo conforme carta de controle	Nenhuma ação necessária					
	Abertura Menor	não permite montagem	7		Excesso de pressão	2	Liberação de Set Up Conforme carta de controle		4	Inspeção no processo conforme carta de controle	Nenhuma ação necessária					
	Ruptura da peça	Não atende aos requisitos do cliente	7	1.5	Excesso de pressão	2	Liberação de Set Up Conforme carta de controle		4	Inspeção no processo conforme carta de controle	Nenhuma ação necessária					
	Dobra invertida	Montagem de peça trocada	7		Operador não seguiu as instruções de trabalho	2	Treinamento on the job - Folha de processo		4	Inspeção no processo conforme carta de controle	Nenhuma ação necessária					
Embalar	Quantidade de peças incorretas na Caixa	Falta ou sobra de peças no cliente	7		Falha do operador ao disponibilizar peças na caixa	2	Treinamento on the job - Folha de processo		7	Inspeção no processo conforme carta de controle	Nenhuma ação necessária					
	Identificação inadequada	Quebra de rastreabilidade	7		Falha do operador ao disponibilizar peças na caixa	2	Treinamento on the job - Folha de processo		7	Inspeção no processo conforme carta de controle	Nenhuma ação necessária					

Ilustração das irregularidades encontradas no FMEA da Empresa 6

ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS													
FMEA DE PROCESSO													
Item / Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(S) Potencia(S) de Falha	S E V E	C L A S	Causa Potencial (6M) Mecanismos	O C O R	Controle Preventivo Atual	Controle Detecção Atual	D E T C	N P R	Ações Recomendadas	Responsabilidade e pelas ações recomendadas e prazos envolvidos	Ações Resultantes
Recebimento	Material empenado	Prejudica a próxima operação	5	1.5	Armazenagem incorreta	3	Treinamento	Fluxo de retrabalho do recebimento	7	105	Implementar inspeção de recebimento pela qualidade	Qualidade (Ago/2005)	Ação Tomada
	Material Oxidado	Afeta a qualidade do produto	5		Falha do fornecedor	3	Qualificação do Fornecedor e comunicação formal	Fluxo de retrabalho do recebimento	7	105	Implementar inspeção de recebimento pela qualidade	Qualidade (Ago/2005)	
	Material Riscado	Afeta a qualidade do produto	5		Falha do fornecedor	3	Qualificação do Fornecedor e comunicação formal	Fluxo de retrabalho do recebimento	7	105	Implementar inspeção de recebimento pela qualidade	Qualidade (Ago/2005)	
Corte a Laser	Espessura incorreta	Impossibilita a montagem	7		Falha na separação da chapa	2	Fluxo de trabalho Célula Roxa	Inspeção periódica e auditoria do processo	4	56	-----		
	Chamar programa errado	Operação errática	4		Regulagem de Máquina	3	Tab. Regulagem Programa de manutenção preventiva	Inspeção periódica e auditoria do processo	4	48	-----		
	Presença de Rebarba	Aparência degradada	6		Regulagem de Máquina	2	Tab. Regulagem Programa de manutenção preventiva	Inspeção periódica e auditoria do processo	4	48	4.2		
	Dimensional fora do especificado	Dificulta montagem	6	1.7	Ajuste da Máquina	2	Tab. Regulagem Programa de manutenção preventiva	Inspeção periódica e auditoria do processo	4	144	-----		
			7		Desenvolv. da Peça	5	Software contr. Nesting.	Inspeção periódica e auditoria do processo	4	140	-----		
			7			4	Software contr.			112			

Ilustração das irregularidades encontradas no FMEA da Empresa 7

ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS																
FMEA DE PROCESSO																
Item / Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(S) Potenciais de Falha	S E V	C L A S	Causa Potencial (6M) Mecanismos	O C O R	Controle Preventivo Atual	Controle Detecção Atual	D E T C	Ações Recomendadas	Responsabilidade e pelas ações recomendadas e prazos envolvidos	Ações Resultantes				
												Ação Tomada	S E V	D E T C	N P R	.
Armazenar Matéria-Prima	Mistura de Material	Peças produzidas com material diferente do especificado	6		falha de identificação	3	Procedimento para identificação das chapas	Formulário de inspeção de estoque	3	54						
	Varição no corte	Aspecto visual ruim	7		Fixação inadequada da chapa durante o corte	3	Fixar chapas conforme folha de processo específica	Inspeção de processo conforme instrução	3	63						
	Empenamento	Empenamento fora do especificado em desenho	7		temperatura de corte	5	Verificar ajuste da temperatura no Set Up	Inspeção de processo conforme instrução	2	70						
Cortar a quente	Falha nas peças	Aspecto visual ruim	7		Bico de corte inadequado e sujo	3	Verificar o número do programa de corte antes da	Inspeção Visual	3	63						
	Lixamento excessivo	Dimensões fora do especificado	5		Disco inadequado para a operação	2	Folha de processo define a lixa apropriada para cada	Inspeção de processo conforme instrução	3	30						

Ilustração das irregularidades encontradas no FMEA da Empresa 8

ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS												
FMEA DE PROCESSO												
Item / Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(S) Potencia(S) de Falha	S E V E	C L A S	Causa Potencial (6M) Mecanismos	O C O R	Controle Preventivo Atual	Controle Detecção Atual	D E T C	N P R	Ações Recomendadas	Responsabilidade e pelas ações recomendadas e prazos envolvidos
Usinar peças	Usinagem de peças com diâmetros maiores que o especificado	Não permite montagem	6		Set Up Inadequado (falha na programação)	2	-	Inspeção de processo conforme carta de controle	4	48		
	Usinagem de peças com diâmetros menores que o especificado	Não permite montagem	6		Set Up Inadequado (falha na programação)	3	-	Inspeção de processo conforme carta de controle	4	72		
	Usinagem de peças com comprimentos maiores do que o especificado	Não permite montagem	6		Set Up Inadequado (falha na programação)	4	-	Inspeção de processo conforme carta de controle	4	96		
	Usinagem de peças com comprimentos menores do que o especificado	Não permite montagem	6		Set Up Inadequado (falha na programação)	4	-	Inspeção de processo conforme carta de controle	4	96		
	Deformações e falha de acabamento	Não atende aos requisitos do cliente	6		Set Up Inadequado (falha na programação)	4	-	Inspeção de processo conforme carta de controle	4	96		
Recebimento de peças após tratamento superficial	Recebimento de peças em quantidade insuficiente	Não atende aos requisitos do cliente	6		Set Up Inadequado (falha na programação)	4	-	Inspeção de processo conforme carta de controle	4	96		
Embalar peças	Recebimento de peças com dureza abaixo do especificado	Não atendimento ao prazo de entrega	7		Falha da contagem do fornecedor	2	Procedimento de contagem do fornecedor	Inspeção conforme solicitação de nota fiscal	5	70		
	Caixa sem identificação	Envio de peças sem identificação ao cliente	6		Falha no processo do fornecedor	2	Procedimento de contagem do fornecedor	Inspeção conforme solicitação de nota fiscal	5	60		
					Falha do operador ao disponibilizar as peças na caixa	2	-	Instrução de embalagem	5	60		

Ilustração das irregularidades encontradas no FMEA da Empresa 9

ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS																	
FMEA DE PROCESSO																	
Item / Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(S) Potenciai(S) de Falha	S E V E .	C L A .	Causa Potencial (6M) Mecanismos	O C O R .	Controle Preventivo Atual	Controle Detecção Atual	D E T C .	N P R	Ações Recomendadas	Responsabilidade e pelas ações recomendadas e prazos envolvidos	Ações Resultantes				
													Ação Tomada	S E V E .	O C O R .	D E T C .	N P R
Recebimento	Diâmetro externo fora dos limites especificados	1.2 Maior / Menor	6	1.5	Falta de controle no processo do fornecedor	3	Aprovação e monitoramento do fornecedor	Inspeção e ensaio do material no recebimento	5	90							
Recozer	Dureza fora dos limites especificados	Trincas e deformações	6		Processo especial não monitorado	3	Aprovação inicial do processo de tratamento térmico	Instrução de trabalho / ordem de fabricação	5	90							
Decapar	Material com manchas e óxidos	Não atende às especificações do cliente	6	1.5	Tempo de exposição menor que o estipulado	3	Aprovação inicial do processo de decapagem	Insstrução de trabalho / ordem de fabricação	5	90							
Trefilar	Diâmetro externo fora dos limites especificados	Maior / Menor	6		Preparação irregular do processo de trefilação	3	Aprovação inicial do processo de trefila	Instrução de trabalho / ordem de fabricação	5	90							
	Diâmetro interno fora dos limites especificados	Maior / Menor	6		Preparação irregular do processo de trefilação	3	Aprovação inicial do processo de trefila	Instrução de trabalho / ordem de fabricação	5	90							
	Espessura fora dos limites especificados	Maior / Menor	6		Preparação irregular do processo de trefilação	3	Aprovação inicial do processo de trefila	Instrução de trabalho / ordem de fabricação	5	90							
Cortar no comprimento final	Corte do comprimento fora dos limites de especificação	Comprimento maior não monta	4		Falta de controle no processo	3	Monitoramento do processo de fabricação	Inspeção e ensaios de material	5	60	4.1						
		Comprimento menor gera sucata	6		Falta de controle no processo	3	Monitoramento do processo de fabricação	Inspeção e ensaios de material	5	90							

Ilustração das irregularidades encontradas no FMEA da Empresa 10

ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS																	
FMEA DE PROCESSO																	
Item / Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(S) Potenciais de Falha	S E V E .	C L A S .	Causa Potencial (6M) Mecanismos	O C O R .	Controle Preventivo Atual	Controle Detecção Atual	D E T C .	N P R	Ações Recomendadas	Responsabilidade e pelas ações recomendadas e prazos envolvidos	Ações Resultantes				
													Ação Tomada	S E V E .	O C O R .	D E T C .	N P R
Recebimento e inspeção	1.2 Peso do material acima do solicitado	Espaço insuficiente para estocar material	3	1.6	Pedido efetuado verbalmente	2	Confirmação do pedido via fax	Relatório de inspeção de recebimento	4	24							
	Consumo do estoque mínimo	Atraso na entrega	7		Falta de matéria-prima no mercado	6	Acionar fornecedor alternativo	análise do relatório de estoque	1	42							
	Composição química fora do especificado	Produto final fora do especificado	6		Pedido enviado com informações faltantes	2	Cadastro prévio das informações no sistema	Relatório de inspeção de recebimento	4	48							
Perfuração	Diâmetro fora do especificado	Sucata	8		Máquina desregulada	2	Procedimento operacional	Inspeção por plano de amostragem	3	48							
Embalagem material	Cinta de aço / quantidade em desacordo	Não há atendimento da quantidade programada	7	1.5	Erro na emissão da nota fiscal	2	Conferência da NF com relatório de entrega	Conferência da NF com etiqueta do produto	5	70							
	Barra trocada	Rejeição pelo cliente	7		Falha de identificação	2	Conferência da NF com relatório de entrega	Conferência da NF com etiqueta do produto	5	70							

Ilustração das irregularidades encontradas no FMEA da Empresa 11

APÊNDICE 1 – Regras *fuzzy* para a primeira situação de avaliação dos desempenho dos FMEAs

LOGICA FUZZY - Regras para a avaliação do desempenho da aplicação dos FMEAs					Ação	
REGRAS	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Não Aceitável	Aceitável
1	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	X	
2	MÉDIA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	X	
3	ALTA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	X	
4	BAIXA	MÉDIA	BAIXA	BAIXA	X	
5	MÉDIA	MÉDIA	BAIXA	BAIXA	X	
6	ALTA	MÉDIA	BAIXA	BAIXA	X	
7	BAIXA	ALTA	BAIXA	BAIXA	X	
8	MÉDIA	ALTA	BAIXA	BAIXA	X	
9	ALTA	ALTA	BAIXA	BAIXA	X	
10	BAIXA	BAIXA	MÉDIA	BAIXA	X	
11	MÉDIA	BAIXA	MÉDIA	BAIXA	X	
12	ALTA	BAIXA	MÉDIA	BAIXA	X	
13	BAIXA	MÉDIA	MÉDIA	BAIXA	X	
14	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	BAIXA	X	
15	ALTA	MÉDIA	MÉDIA	BAIXA	X	
16	BAIXA	ALTA	MÉDIA	BAIXA	X	
17	MÉDIA	ALTA	MÉDIA	BAIXA		X
18	ALTA	ALTA	MÉDIA	BAIXA		X
19	BAIXA	BAIXA	ALTA	BAIXA	X	
20	MÉDIA	BAIXA	ALTA	BAIXA	X	
21	ALTA	BAIXA	ALTA	BAIXA	X	
22	BAIXA	MÉDIA	ALTA	BAIXA	X	
23	MÉDIA	MÉDIA	ALTA	BAIXA		X
24	ALTA	MÉDIA	ALTA	BAIXA		X
25	BAIXA	ALTA	ALTA	BAIXA	X	
26	MÉDIA	ALTA	ALTA	BAIXA		X
27	ALTA	ALTA	ALTA	BAIXA		X
28	BAIXA	BAIXA	BAIXA	MÉDIA	X	
29	MÉDIA	BAIXA	BAIXA	MÉDIA	X	
30	ALTA	BAIXA	BAIXA	MÉDIA	X	
31	BAIXA	MÉDIA	BAIXA	MÉDIA	X	
32	MÉDIA	MÉDIA	BAIXA	MÉDIA		X
33	ALTA	MÉDIA	BAIXA	MÉDIA		X
34	BAIXA	ALTA	BAIXA	MÉDIA	X	
35	MÉDIA	ALTA	BAIXA	MÉDIA		X
36	ALTA	ALTA	BAIXA	MÉDIA		X
37	BAIXA	BAIXA	MÉDIA	MÉDIA	X	
38	MÉDIA	BAIXA	MÉDIA	MÉDIA		X
39	ALTA	BAIXA	MÉDIA	MÉDIA		X
40	BAIXA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	X	
41	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA		X
42	ALTA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA		X
43	BAIXA	ALTA	MÉDIA	MÉDIA		X

44	MÉDIA	ALTA	MÉDIA	MÉDIA		X
45	ALTA	ALTA	MÉDIA	MÉDIA		X
46	BAIXA	BAIXA	ALTA	MÉDIA	X	
47	MÉDIA	BAIXA	ALTA	MÉDIA		X
48	ALTA	BAIXA	ALTA	MÉDIA		X
49	BAIXA	MÉDIA	ALTA	MÉDIA		X
50	MÉDIA	MÉDIA	ALTA	MÉDIA		X
51	ALTA	MÉDIA	ALTA	MÉDIA		X
52	BAIXA	ALTA	ALTA	MÉDIA		X
53	MÉDIA	ALTA	ALTA	MÉDIA		X
54	ALTA	ALTA	ALTA	MÉDIA		X
55	BAIXA	BAIXA	BAIXA	ALTA	X	
56	MÉDIA	BAIXA	BAIXA	ALTA	X	
57	ALTA	BAIXA	BAIXA	ALTA	X	
58	BAIXA	MÉDIA	BAIXA	ALTA	X	
59	MÉDIA	MÉDIA	BAIXA	ALTA		X
60	ALTA	MÉDIA	BAIXA	ALTA		X
61	BAIXA	ALTA	BAIXA	ALTA	X	
62	MÉDIA	ALTA	BAIXA	ALTA		X
63	ALTA	ALTA	BAIXA	ALTA		X
64	BAIXA	BAIXA	MÉDIA	ALTA	X	
65	MÉDIA	BAIXA	MÉDIA	ALTA		X
66	ALTA	BAIXA	MÉDIA	ALTA		X
67	BAIXA	MÉDIA	MÉDIA	ALTA		X
68	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	ALTA		X
69	ALTA	MÉDIA	MÉDIA	ALTA		X
70	BAIXA	ALTA	MÉDIA	ALTA		X
71	MÉDIA	ALTA	MÉDIA	ALTA		X
72	ALTA	ALTA	MÉDIA	ALTA		X
73	BAIXA	BAIXA	ALTA	ALTA	X	
74	MÉDIA	BAIXA	ALTA	ALTA		X
75	ALTA	BAIXA	ALTA	ALTA		X
76	BAIXA	MÉDIA	ALTA	ALTA		X
77	MÉDIA	MÉDIA	ALTA	ALTA		X
78	ALTA	MÉDIA	ALTA	ALTA		X
79	BAIXA	ALTA	ALTA	ALTA		X
80	MÉDIA	ALTA	ALTA	ALTA		X
81	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA		X

APÊNDICE 2 – Regras *fuzzy* para a segunda situação de avaliação dos desempenho dos FMEAs

Regras para a avaliação do desempenho da aplicação dos FMEAs					Ação	
REGRAS	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Não Aceitável	Aceitável
1	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	X	
2	MÉDIA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	X	
3	ALTA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	X	
4	BAIXA	MÉDIA	BAIXA	BAIXA	X	
5	MÉDIA	MÉDIA	BAIXA	BAIXA	X	
6	ALTA	MÉDIA	BAIXA	BAIXA	X	
7	BAIXA	ALTA	BAIXA	BAIXA	X	
8	MÉDIA	ALTA	BAIXA	BAIXA	X	
9	ALTA	ALTA	BAIXA	BAIXA	X	
10	BAIXA	BAIXA	MÉDIA	BAIXA	X	
11	MÉDIA	BAIXA	MÉDIA	BAIXA	X	
12	ALTA	BAIXA	MÉDIA	BAIXA	X	
13	BAIXA	MÉDIA	MÉDIA	BAIXA	X	
14	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	BAIXA	X	
15	ALTA	MÉDIA	MÉDIA	BAIXA	X	
16	BAIXA	ALTA	MÉDIA	BAIXA	X	
17	MÉDIA	ALTA	MÉDIA	BAIXA	X	
18	ALTA	ALTA	MÉDIA	BAIXA	X	
19	BAIXA	BAIXA	ALTA	BAIXA	X	
20	MÉDIA	BAIXA	ALTA	BAIXA	X	
21	ALTA	BAIXA	ALTA	BAIXA	X	
22	BAIXA	MÉDIA	ALTA	BAIXA	X	
23	MÉDIA	MÉDIA	ALTA	BAIXA	X	
24	ALTA	MÉDIA	ALTA	BAIXA	X	
25	BAIXA	ALTA	ALTA	BAIXA	X	
26	MÉDIA	ALTA	ALTA	BAIXA	X	
27	ALTA	ALTA	ALTA	BAIXA	X	
28	BAIXA	BAIXA	BAIXA	MÉDIA	X	
29	MÉDIA	BAIXA	BAIXA	MÉDIA	X	
30	ALTA	BAIXA	BAIXA	MÉDIA	X	
31	BAIXA	MÉDIA	BAIXA	MÉDIA	X	
32	MÉDIA	MÉDIA	BAIXA	MÉDIA	X	
33	ALTA	MÉDIA	BAIXA	MÉDIA	X	
34	BAIXA	ALTA	BAIXA	MÉDIA	X	
35	MÉDIA	ALTA	BAIXA	MÉDIA	X	
36	ALTA	ALTA	BAIXA	MÉDIA	X	
37	BAIXA	BAIXA	MÉDIA	MÉDIA	X	
38	MÉDIA	BAIXA	MÉDIA	MÉDIA	X	

39	ALTA	BAIXA	MÉDIA	MÉDIA	X	
40	BAIXA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	X	
41	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA		X
42	ALTA	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA		X
43	BAIXA	ALTA	MÉDIA	MÉDIA	X	
44	MÉDIA	ALTA	MÉDIA	MÉDIA		X
45	ALTA	ALTA	MÉDIA	MÉDIA		X
46	BAIXA	BAIXA	ALTA	MÉDIA	X	
47	MÉDIA	BAIXA	ALTA	MÉDIA	X	
48	ALTA	BAIXA	ALTA	MÉDIA	X	
49	BAIXA	MÉDIA	ALTA	MÉDIA	X	
50	MÉDIA	MÉDIA	ALTA	MÉDIA		X
51	ALTA	MÉDIA	ALTA	MÉDIA		X
52	BAIXA	ALTA	ALTA	MÉDIA	X	
53	MÉDIA	ALTA	ALTA	MÉDIA		X
54	ALTA	ALTA	ALTA	MÉDIA		X
55	BAIXA	BAIXA	BAIXA	ALTA	X	
56	MÉDIA	BAIXA	BAIXA	ALTA	X	
57	ALTA	BAIXA	BAIXA	ALTA	X	
58	BAIXA	MÉDIA	BAIXA	ALTA	X	
59	MÉDIA	MÉDIA	BAIXA	ALTA	X	
60	ALTA	MÉDIA	BAIXA	ALTA	X	
61	BAIXA	ALTA	BAIXA	ALTA	X	
62	MÉDIA	ALTA	BAIXA	ALTA	X	
63	ALTA	ALTA	BAIXA	ALTA	X	
64	BAIXA	BAIXA	MÉDIA	ALTA	X	
65	MÉDIA	BAIXA	MÉDIA	ALTA	X	
66	ALTA	BAIXA	MÉDIA	ALTA	X	
67	BAIXA	MÉDIA	MÉDIA	ALTA	X	
68	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA	ALTA		X
69	ALTA	MÉDIA	MÉDIA	ALTA		X
70	BAIXA	ALTA	MÉDIA	ALTA	X	
71	MÉDIA	ALTA	MÉDIA	ALTA		X
72	ALTA	ALTA	MÉDIA	ALTA		X
73	BAIXA	BAIXA	ALTA	ALTA	X	
74	MÉDIA	BAIXA	ALTA	ALTA	X	
75	ALTA	BAIXA	ALTA	ALTA	X	
76	BAIXA	MÉDIA	ALTA	ALTA	X	
77	MÉDIA	MÉDIA	ALTA	ALTA		X
78	ALTA	MÉDIA	ALTA	ALTA		X
79	BAIXA	ALTA	ALTA	ALTA	X	
80	MÉDIA	ALTA	ALTA	ALTA		X
81	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA		X

APÊNDICE 3 – Cálculos da Desfuzzificação pelo método do baricentro

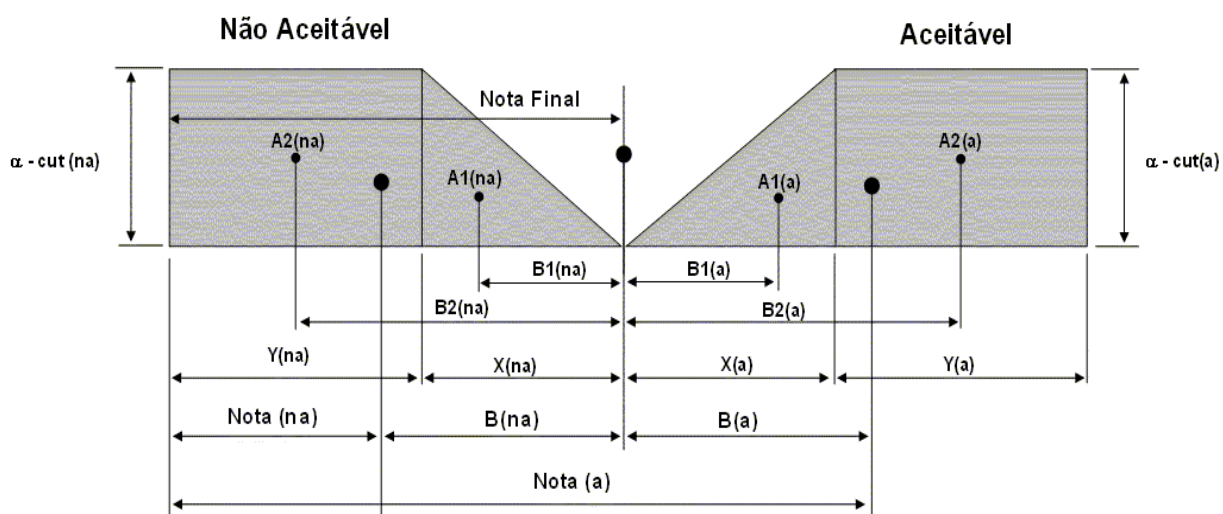


Ilustração do cálculo do baricentro

NÃO ACEITÁVEL								
FMEA	$\alpha - cut(a)$	$X(a)$	$Y(a)$	$B1(a)$	$B2(a)$	$A1(a)$	$A2(a)$	$B(a)$
Empresa 1	0,53	0,212	0,188	0,141	0,306	0,056	0,100	0,247
Empresa 2	0,52	0,208	0,192	0,139	0,304	0,054	0,100	0,246
Empresa 3	0,54	0,216	0,184	0,144	0,308	0,058	0,099	0,247
Empresa 4	0,39	0,156	0,244	0,104	0,278	0,030	0,095	0,236
Empresa 5	0,46	0,184	0,216	0,123	0,292	0,042	0,099	0,241
Empresa 6	0,31	0,124	0,276	0,083	0,262	0,019	0,086	0,229
Empresa 7	0,50	0,200	0,200	0,133	0,300	0,050	0,100	0,244
Empresa 8	0,40	0,160	0,240	0,107	0,280	0,032	0,096	0,237
Empresa 9	0,25	0,100	0,300	0,067	0,250	0,013	0,075	0,224
Empresa 10	0,44	0,176	0,224	0,117	0,288	0,039	0,099	0,240
Empresa 11	0,31	0,124	0,276	0,083	0,262	0,019	0,086	0,229

Valores do cálculo do baricentro para a ação não aceitar

NÃO ACEITÁVEL								
FMEA	$\alpha - cut(na)$	X(na)	Y(na)	B1(na)	B2(na)	A1(na)	A2(na)	B(na)
Empresa 1	0,16	0,096	0,504	0,064	0,252	0,008	0,081	0,236
Empresa 2	0,16	0,096	0,504	0,064	0,252	0,008	0,081	0,236
Empresa 3	0,00	0,000	0,600	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Empresa 4	0,00	0,000	0,600	0,000	0,300	0,000	0,000	0,000
Empresa 5	0,00	0,000	0,600	0,000	0,300	0,000	0,000	0,000
Empresa 6	0,00	0,000	0,600	0,000	0,300	0,000	0,000	0,000
Empresa 7	0,01	0,006	0,594	0,004	0,297	0,000	0,006	0,296
Empresa 8	0,00	0,000	0,600	0,000	0,300	0,000	0,000	0,000
Empresa 9	0,16	0,096	0,504	0,064	0,252	0,008	0,081	0,236
Empresa 10	0,00	0,000	0,600	0,000	0,300	0,000	0,000	0,000
Empresa 11	0,00	0,000	0,600	0,000	0,300	0,000	0,000	0,000

Valores do cálculo do baricentro para a ação aceitar