

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

GUILHERME ANTONIO FAUSTINI AJEJE

Fuzzy-FMEA:

Uso da Lógica Fuzzy para Ponderação das Falhas no FMEA

São Carlos

2015

GUILHERME ANTONIO FAUSTINI AJEJE

Fuzzy-FMEA:

Uso da Lógica *Fuzzy* para Ponderação das Falhas no FMEA

**Monografia apresentada à
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Engenheiro
de Produção**

**Área de Concentração:
Gestão da Qualidade**

**Orientador: Prof. Dr.
Luiz Cesar Ribeiro Carpinetti**

**São Carlos
2015**

Resumo

AJEJE, G. A. F. **Fuzzy-FMEA: Uso da Lógica Fuzzy para Ponderação das Falhas no FMEA.** Trabalho de Conclusão de Curso. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

O uso de ferramentas e métodos que auxiliem na identificação e melhore o atendimento dos requisitos dos clientes se torna cada vez mais importante no cenário global de intensa competição entre empresas. O desenvolvimento e, posterior, aprimoramento de tais ferramentas se tornam essenciais na busca de processos mais eficazes. Neste presente trabalho, alia-se o uso da lógica *fuzzy* ao FMEA para, assim, eliminar as fragilidades desta ferramenta. Para tal efeito, este trabalho realiza comparações entre um Sistema de Inferência *Fuzzy-FMEA* com o FMEA tradicional e, posteriormente, avalia os resultados obtidos. Como resultado, o Sistema de Inferência *Fuzzy-FMEA* apresenta vantagens e elimina algumas fragilidades que o FMEA tradicional apresenta, como por exemplo, situações em que o NPR não reflete o verdadeiro risco da falha. Portanto, o uso da lógica *fuzzy* aliado ao FMEA contribui para uma alocação de recursos para ações de correção mais eficaz, pois retorna melhores resultados em relação à incerteza de risco.

Palavras-chave: FMEA. Lógica *fuzzy*. Inferência *fuzzy*. *Fuzzy-FMEA*.

Abstract

AJEJE, G. A. F. **Fuzzy-FMEA: Using the Fuzzy Logic for Pondering the Failures on FMEA.** Graduation Work. Engineering School of São Carlos - University of São Paulo, São Carlos, 2015.

The use of tools and methods that assists to identify and improve the customer service requirements becomes increasingly important in the global scenario of intense competition between companies. The development and, later, improvement of such tools become essential in the search for more effective processes. The goal of this monograph is to combine the use of fuzzy logic to the FMEA to eliminate the weaknesses of this tool. For this purpose, this monograph performs comparisons between a *Fuzzy-FMEA* Inference System, developed here, with the traditional FMEA and then evaluates the results. As a result, *Fuzzy-FMEA* Inference System has advantages and eliminates some traditional FMEA's weaknesses, for example, situations in which the NPR does not reflect the real risk of failure. Therefore, the use of fuzzy logic combined with FMEA contributes to an allocation of resources more effective for corrective actions because it returns better results in relation to the risk of uncertainty.

Keywords: FMEA. *Fuzzy* logic. *Fuzzy* Inference. *Fuzzy-FMEA*.

Lista de Figuras

Figura 1 - Espiral do Progresso em Qualidade – Juran - Tóquio	12
Figura 2 - Elementos da Gestão pela Qualidade Total ou TQM	14
Figura 3 - Processo de Inferência Fuzzy	22
Figura 4 – Número Fuzzy Triangular	23
Figura 5 - Visão Geral do Sistema de Avaliação Crítica Fuzzy	25
Figura 6 - Funções de Pertinência do Critério Severidade	32
Figura 7 - Funções de Pertinência do Critério Ocorrência	33
Figura 8 - Funções de Pertinência do Critério Detecção	33
Figura 9 - Funções de Pertinência do Número de Prioridade de Risco	34
Figura 10 - Representação do Sistema de Inferência Fuzzy no fuzzyTECH	39

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Pontuação de Severidade	18
Tabela 2 - Pontuação da Ocorrência por Probabilidade de Ocorrência.....	19
Tabela 3 – Pontuação de Detecção	19
Tabela 4 - Variáveis de Entrada e Seus Termos Linguísticos	30
Tabela 5 - Variável de Saída e Seus Termos Linguísticos	31
Tabela 6 – Parâmetros Utilizados para as Variáveis de Entrada	32
Tabela 7 - Parâmetros Utilizados para a Variável de Saída	34
Tabela 8 – Base de Regras.....	37
Tabela 9 - FMEA do Motor (EESC – USP Formula)	42
Tabela 10 – Comparativo entre FMEA Tradicional e Fuzzy-FMEA (Caso 1)	43
Tabela 11 – FMEA de Pneu de Veículos Leves	46
Tabela 12 – Comparativo entre FMEA Tradicional e Fuzzy-FMEA (Caso 2)	47

Sumário

1.	Introdução.....	8
1.1.	Contextualização e Justificativa.....	8
1.2.	Objetivo	10
1.3.	Método de Desenvolvimento	10
2.	Revisão Bibliográfica	11
2.1.	Gestão da Qualidade	11
2.1.1.	Contextualização do Atual Papel da Gestão da Qualidade	11
2.1.2.	Evolução da Gestão da Qualidade.....	12
2.2.	Análise dos Modos e Efeitos de Falha (FMEA).....	15
2.2.1.	Contextualização do Uso do FMEA.....	15
2.2.2.	Visão Geral do FMEA.....	16
2.2.3.	Número de Prioridade de Risco (NPR)	17
2.2.3.1.	Severidade de Falha	18
2.2.3.2.	Ocorrência de Falha	18
2.2.3.3.	Detecção de Falha	19
2.2.4.	Limitações do FMEA	20
2.3.	Lógica <i>Fuzzy</i>	21
2.3.1.	Contextualização do Uso da Lógica <i>Fuzzy</i>	21
2.3.2.	Visão Geral da Lógica <i>Fuzzy</i>	22
2.3.3.	Aplicação da Inferência <i>Fuzzy</i> ao FMEA	25
2.3.4.	Benefícios do Uso da Lógica <i>Fuzzy</i> aliada ao FMEA.....	28
3.	Parametrização de um Sistema <i>Fuzzy</i> FMEA	30
3.1.	Definição das Variáveis de Entrada e Saída	30
3.2.	Definição dos Termos Linguísticos	30
3.3.	Desenvolvimento do Sistema <i>Fuzzy</i> FMEA no fuzzyTECH.....	31
3.3.1.	Apresentação do fuzzyTECH	31
3.3.2.	Desenvolvimento das Funções de Pertinência.....	31
3.3.3.	Desenvolvimento da Base de Regras.....	35
3.3.4.	Definição dos Operadores <i>Fuzzy</i> do Processo de Inferência	38
3.3.5.	Representação do Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i>	38
4.	Estudos de Caso e Resultados	40
4.1.	Introdução	40
4.2.	Primeiro Caso	40

4.2.1.	Descrição do Primeiro Caso a Ser Estudado	40
4.2.2.	Análise FMEA da EESC – USP Formula	41
4.2.3.	Estudo Comparativo entre FMEA Tradicional e <i>Fuzzy</i> FMEA	43
4.3.	Segundo Caso	45
4.3.1.	Descrição do Segundo Caso a Ser Estudado	45
4.3.2.	Análise FMEA do Grupo de Gestão da Qualidade.....	46
4.3.3.	Estudo Comparativo entre FMEA Tradicional e <i>Fuzzy</i> FMEA	46
5.	Conclusão	50
6.	Referências Bibliográficas	52

1. Introdução

1.1. Contextualização e Justificativa

O conceito de gestão da qualidade tem entre seus objetivos a melhoria dos atendimentos dos requisitos dos clientes. Saber e entender o que o cliente espera é de vital importância para uma empresa. Por isso, a procura por meios e ferramentas que auxiliem na identificação e, posterior, aprimoramento do atendimento desses requisitos torna-se importante no contexto de uma empresa.

Segundo Oliveira (2004), “o cliente é a figura principal de todo processo organizacional”. Assim, faz-se necessário que as tarefas operacionais e decisões empresariais levem em consideração as expectativas e necessidades do consumidor e, até mesmo, tentem superá-las com o intuito de satisfazer completamente os requisitos dos clientes.

Uma técnica bastante usada para minimizar o risco de não atendimento destes requisitos é o FMEA (“*Failure Mode and Effect Analysis*”, ou, em livre tradução para o português, Análise dos Modos e Efeitos de Falha). A análise FMEA consiste em uma abordagem caracterizada por passos que têm como objetivo principal a identificação e classificação, através do índice Número de Prioridade de Risco (NPR), de todas as falhas possíveis em um projeto, um processo de fabricação ou montagem, ou de um produto ou serviço. Segundo Stamatidis (1995), o FMEA apresenta diversas aplicações, sendo elas:

- FMEA de Sistema – analisa sistemas e subsistemas nas fases iniciais de concepção e projeto. Através da interação dos sistemas e subsistemas, este tipo de aplicação enfoca os modos potenciais de falha entre funções do sistema, derivadas de deficiências do sistema;
- FMEA de Projeto – analisa produtos antes de serem liberados para produção. Este tipo de aplicação enfoca os modos potenciais de falha causados por deficiências na fase de projeto do produto;
- FMEA de Processo – analisa os processos de fabricação e montagem. Este tipo de aplicação enfoca os modos potenciais de falha causados pelas deficiências nos processos de fabricação e/ou de montagem;

- FMEA de Serviço – analisa os serviços utilizados para atingir o cliente. Este tipo de aplicação enfoca os modos de falha causados pelas deficiências do sistema ou processo.

Porém, apesar do FMEA estar presente no meio empresarial de hoje, existe uma dificuldade em determinar com precisão a ocorrência de falhas. Além disso, a análise FMEA não leva em consideração as interrelações entre os diversos modos de falha identificados. Assim, esta técnica apresenta algumas fragilidades:

- Por simplificação, os fatores ocorrência, severidade e detecção da falha apresentam a mesma ponderação na avaliação (CHANG et al. 2010* apud KUMRU et al., 2013). Ou seja, a interrelação entre os fatores não é considerada;
- Os números de prioridade de risco apresentam muitos valores duplicados (CHANG et al., 2010 apud KUMRU et al., 2013). Com isso, a designação de recursos para ações de correção pode ser efetuada de forma errônea, visto que as implicações de risco de cada modo de falha podem ser totalmente diferentes;
- O índice Número de Prioridade de Risco é derivado apenas de três fatores, principalmente em termos de segurança, e não leva em consideração as relações indiretas entre componentes (CHANG et al., 2010 apud KUMRU et al., 2013);
- A atribuição de notas entre 1 e 10 para diferentes fatores a partir da opinião de analistas pode causar problemas, visto que precisam se basear em dados escassos e não confiáveis (CHANG et al., 2010 apud KUMRU et al., 2013).

Posto isso, a fim de diminuir os efeitos causados no cálculo do Número de Prioridade de Risco a partir de notas de julgamento estritamente subjetivo, este presente estudo adota o uso da lógica *fuzzy*. Com a utilização desta ferramenta, é possível criar modelos matemáticos que contemplem problemas que apresentam um grande grau de incerteza e que não desconsideram aspectos algumas vezes ignorados na aplicação de lógicas tradicionais (AGUADO et al., 2010). Assim, o uso da lógica *fuzzy* permite reduzir essas fragilidades e ajudar na tomada de decisões caracterizadas por informações imprecisas.

* CHANG, K.-H.; CHENG, C.-H. *A Risk Assessment Methodology Using Intuitionistic Fuzzy Set in FMEA*. International Journal of Systems Science, 2010.

1.2. Objetivo

Estudar e implementar o *Fuzzy FMEA* para priorização de falhas e avaliar os resultados da aplicação em comparação com o FMEA tradicional.

1.3. Método de Desenvolvimento

O desenvolvimento do trabalho foi feito segundo as etapas e atividades listadas a seguir:

- Revisão bibliográfica;
- Desenvolvimento do sistema *Fuzzy FMEA*: definição das variáveis linguísticas;
- Levantamento da opinião de especialistas para a definição das regras de inferência;
- Implementação do *Fuzzy FMEA* usando o programa FuzzyTech;
- Avaliação dos resultados e comparação dos resultados com o FMEA tradicional;
- Discussão e conclusão.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Gestão da Qualidade

2.1.1. Contextualização do Atual Papel da Gestão da Qualidade

Com o atual cenário global de intensa competição entre empresas e diminuição do crescimento econômico, as transformações tanto na área de qualidade, quanto na área de produtividade, fazem-se necessárias e extremamente importantes. Isto é, a sobrevivência de uma empresa passa pela consolidação da qualidade de seus produtos e serviços. Esse panorama se deve ao fato, também, de que os clientes passaram a exigir maior qualidade nos produtos e serviços a um preço menor. Ou seja, o desejo e a opinião dos clientes se tornou fundamental nas organizações e fator chave na competição empresarial (BOARIN PINTO et al., 2006).

Aliado a esse fato, a gestão da qualidade assume papel importante nas empresas e no cenário econômico mundial. Segundo Toledo (1997), a gestão da qualidade é definida como “a abordagem adotada e o conjunto de práticas utilizadas para obter, de forma eficiente e eficaz, a qualidade pretendida pelo produto”. Ou seja, são atividades com o objetivo de melhorar os produtos e/ou serviços visando atingir a satisfação do cliente. De acordo com Slack (1999), a gestão da qualidade constitui as operações produtivas das empresas que incidem diretamente nas atividades de planejamento, controle e melhoria.

A gestão da qualidade é vista como uma estratégia competitiva que têm como objetivo conquistar mercados e reduzir desperdícios. Para o primeiro fator, é importante que se atenda aos requisitos dos clientes. Com o atendimento desses requisitos, os clientes ficarão satisfeitos e, consequentemente, aumentara-se o faturamento, a reputação da empresa, o número de pedidos, os empregos e a remuneração dos empregados. Já com relação ao segundo fator, é importante reduzir os desperdícios e os custos de não qualidade. Assim, com menos desperdícios e menores custos, melhores serão os resultados e mais competitiva se tornará a empresa (CARPINETTI et al., 2011).

2.1.2. Evolução da Gestão da Qualidade

Ao longo do século XX, a gestão da qualidade passou por importantes transformações, as quais podem ser representadas por quatro estágios marcantes: a inspeção do produto, o controle do processo, os sistemas de garantia da qualidade e a gestão da qualidade total (ou TQM, do inglês *Total Quality Management*). Os dois últimos estágios são resultados importantes dessa evolução, e vêm sendo amplamente usados por grande parte das organizações no Brasil e no exterior (CARPINETTI et al., 2011).

Até a década de 50, a gestão da qualidade tinha como objetivo apenas garantir a conformidade dos resultados com as especificações através da inspeção e controle dos resultados dos processos de fabricação, ou seja, era limitada ao processo de fabricação. Porém, nas últimas décadas, a gestão da qualidade ampliou o seu contexto para toda a organização, acrescendo-se o início e o fim do ciclo de produção. Uma importante contribuição para tal fato foi o trabalho de Juran, o qual percebeu que a adequação do produto ao uso dependia de várias atividades, nomeadas por ele de função qualidade, ao longo do ciclo produtivo de um produto, que se realizadas levariam ao espiral do progresso (CARPINETTI et al., 2011). O espiral do progresso é representado abaixo:

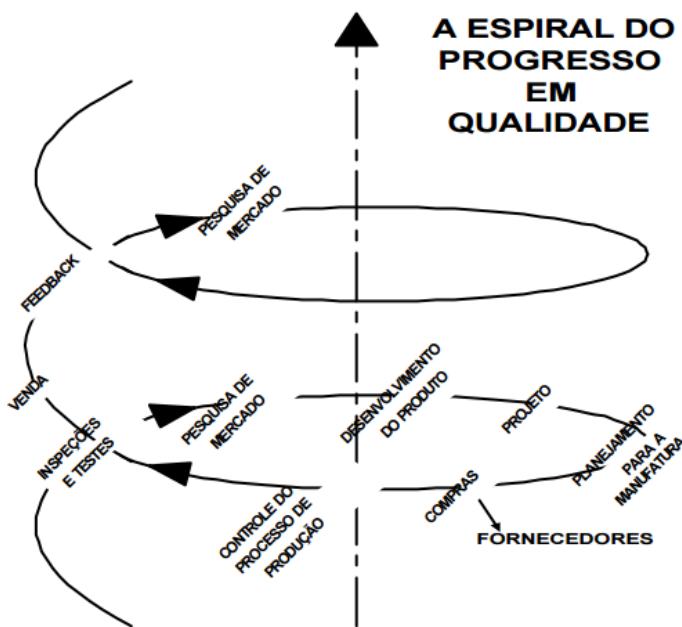


Figura 1 - Espiral do Progresso em Qualidade – Juran - Tóquio (HEGEDUS, 2004)

Além de Juran, tivemos importantes contribuições de Deming. Através dos 14 pontos de Deming, o autor enfatiza a importância de mudar a cultura organizacional e os princípios administrativos e de gestão de recursos humanos da época, através da liderança, do comprometimento e da capacitação para a qualidade. Outra contribuição desse importante guru da qualidade foi o Ciclo PDCA, o qual tem como objetivo de conduzir atividades de melhoria contínua de forma cíclica e representada por quatro fases: planejar (*plan*), executar (*do*), avaliar (*check*) e agir (*act*) para melhoria (CARPINETTI et al., 2011).

O desempenho da indústria japonesa traduzido em satisfação dos clientes quanto à qualidade do produto demonstrou a possibilidade de usar a qualidade como vantagem competitiva e impulsionou um movimento de gestão da qualidade como estratégia competitiva. O processo de melhoria contínua se torna inevitável nesse cenário, visto que com a melhoria de um produto por parte de uma empresa instiga os seus concorrentes a melhorar também. A melhoria do produto se dá necessariamente pela melhoria dos processos e de aspectos importantes da qualidade. Por sua vez, os processos de melhoria contínua de produtos e processos dependem do comprometimento da alta gerência e do capacitação e envolvimento dos funcionários para a melhoria (CARPINETTI et al., 2011).

Segundo Carpinetti et al. (2011), essas afirmações dão base de sustentação para os princípios fundamentais da gestão da qualidade total:

- Foco no cliente e qualidade em primeiro lugar;
- Melhoria contínua de produtos e processos;
- Envolvimento, comprometimento e desenvolvimento dos recursos humanos.

Segundo Crosby (1998), a Gestão pela Qualidade Total (ou do inglês, TQM) significa criar de forma intencional uma cultura organizacional que permita todas as transações serem perfeitamente entendidas e corretamente realizadas, onde os relacionamentos entre fornecedores, funcionários e clientes são bem-sucedidos. Conforme Carpinetti et al. (2011), o TQM é visto como uma estratégia de negócios de modo a maximizar a competitividade de uma empresa através de um conjunto de princípios de gestão, métodos e ferramentas de gestão da qualidade, como demonstrado na figura 2:

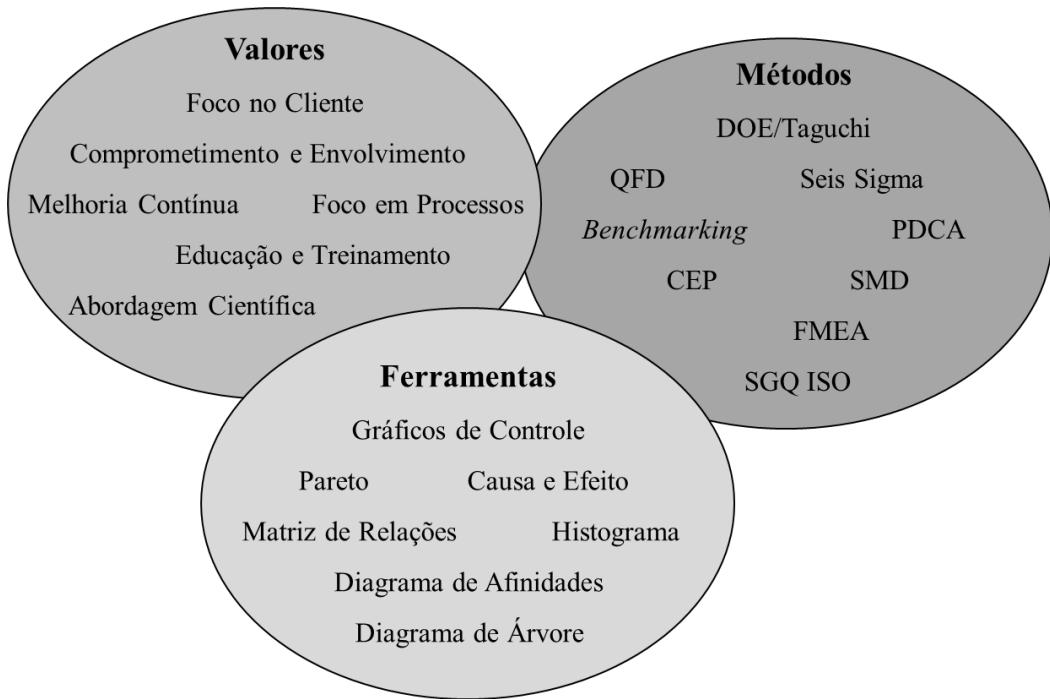


Figura 2 - Elementos da Gestão pela Qualidade Total ou TQM (CARPINETTI et al., 2011)

2.2. Análise dos Modos e Efeitos de Falha (FMEA)

2.2.1. Contextualização do Uso do FMEA

A manufatura competitiva, em um mercado global dinâmico, se estabelece através de um crescimento sustentável e de ganhos através da concepção da fidelidade do cliente pela criação de produtos de alto valor agregado. Para se manterem competitivas em um ambiente altamente competitivo, as empresas buscam o baixo custo e a alta qualidade em seus produtos. Os projetistas de produtos devem possuir um alto padrão de conhecimento e experiência, pois o projeto de um produto exige um conhecimento intensivo e a interação entre diversos parâmetros (CHIN et al., 2008).

Segundo Chin et al. (2008) o projeto de novos produtos é amplamente dependente da experiência humana, das ferramentas, de engenheiros, como o de produção, os quais devem ter uma experiência ampla e conhecimentos específicos nessa área. Porém, há uma escassez de projetistas e engenheiros experientes que vai de encontro com a crescente demanda nas indústrias. Por isso, muitos produtos têm seus projetos alterados durante as fases de projeto, fabricação e produção de ferramentas, a fim de atender os requisitos de manufaturabilidade de ferramentas e economia de produção. Esses problemas levam a longos *lead times* e a altos custos de mudança de projeto. Para competirem nesse cenário, as empresas devem desenvolver produtos com baixo custo, mas com alta qualidade que sejam confiáveis durante o seu ciclo de vida.

A qualidade e a confiabilidade de um produto são essenciais para o desempenho funcional do produto final. Com o intuito de satisfazer os requisitos de confiabilidade do produto, a técnica FMEA é usada na fase inicial do projeto do produto. O uso do FMEA vem crescendo no âmbito de produtos de alto valor agregado, como por exemplo na indústria automotiva. O uso dessa técnica tem como objetivo identificar e analisar as possíveis falhas do produto ou processo, como também os seus efeitos, resultando em ações que podem ser usadas para eliminar ou reduzir a chance que essas potenciais falhas ocorram. É uma técnica analítica formalizada, a qual lista todas as potenciais fontes de falhas e atribui um peso de acordo com a severidade da consequência de cada falha. Ou seja, o FMEA é usado para assegurar que todos os modos de falha no projeto do produto foram considerados e avaliados a fim de reduzi-los, ou até mesmo eliminá-los. Todavia, as dificuldades do uso dessa técnica são geralmente lidar com as

interrelações entre os diversos modos de falha, que possuem informações incertas, limitadas e até mesmo imprecisas quando o FMEA é aplicado na fase de projeto conceitual do produto (CHIN et al., 2008).

Segundo Besterfield et al. (2003^{*} apud KUMRU et al., 2013) o FMEA é uma técnica que combina a experiência das pessoas e a tecnologia para identificar modos de falha previsíveis em um produto ou processo e que planeja a eliminação destes. Essa ferramenta é amplamente usada nas indústrias manufatureiras em várias fases do ciclo de vida de um produto. Recentemente, o seu uso está crescendo também na indústria de serviços. Um exemplo disso é o uso dessa técnica no processo de compras de um hospital público como abordado no artigo “*Fuzzy FMEA Application to Improve Purchasing Process in a Public Hospital*” (KUMRU, 2013).

2.2.2. Visão Geral do FMEA

A técnica FMEA fornece um quadro com a análises das causas e efeitos das potenciais falhas de um produto. A equipe responsável pela construção do FMEA deve ser formada por profissionais de várias áreas, como por exemplo, processo, produção, projeto e qualidade, para que seja feita uma análise minuciosa de todos as relações entre os diversos modos de falha, efeitos, causas, controles utilizados e ações recomendadas. Cada um dos modos de falha identificados nessa técnica é analisado de acordo com três parâmetros, são eles: severidade, probabilidade de ocorrência e dificuldade de detecção. A multiplicação dos três parâmetros (Severidade (S) x Ocorrência (O) x Detecção (D)) retorna um número chamado de Número de Prioridade de Risco (RPN, no inglês ou NPR, no português). O NPR auxilia a equipe de desenvolvimento de produto a identificar as partes ou processos que precisam ser priorizados através de ações de melhoria. Assim, as ações serão priorizadas naqueles parâmetros que excederam um limite preestabelecido ou, em alguns casos, para o maior NPR identificado, independente de um limiar (CHIN et al., 2008).

Ainda segundo Chin et al. (2008), determinar com precisão a probabilidade de ocorrência de uma falha, muitas vezes, pode ser difícil, ou até mesmo impossível. Para

* BESTERFIELD, D. H.; BESTERFIELD, G. H.; BESTERFIELD-M, C.; BESTERFIELD-S, M. **Total Quality Management**. Pearson Education, New Jersey, 2003.

isso, algumas informações na análise FMEA são expressas em termos linguísticos, como por exemplo, “provável”, “importante”, “muito alto”, entre outros. Alguns componentes ou sistemas degradam ao longo do tempo e possuem vários estados. Assim, os estados também podem ser avaliados de forma subjetiva e qualitativa em forma de linguagem natural, como “confiabilidade”, “degradação de performance” e “segurança”. É sempre difícil avaliar essas variáveis linguísticas de forma objetiva. Além disso, a interdependência entre os diversos modos de falha e efeito, no mesmo nível e em diferentes níveis da estrutura hierárquica do produto, não são considerados. A combinação de várias avaliações qualitativas desses modos de falha se torna improvável e difícil de se obter a distribuição de probabilidade quando eles ocorrem simultaneamente. Com isso, a necessidade de equipes experientes e diversificadas se tornam essenciais nesse processo, o que leva a altos custos e impede a aplicação do FMEA em um escopo mais amplo.

2.2.3. Número de Prioridade de Risco (NPR)

O FMEA tradicional usa o número de prioridade de risco (NPR, ou no inglês RPN) para avaliar o nível de risco de um componente ou processo. O NPR é obtido a partir da multiplicação de três fatores (equação 1), que são eles: a severidade da falha (S), a probabilidade de ocorrência (O) e a probabilidade de não detecção da falha (D), ou seja:

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

Geralmente, a análise é feita através da atribuição de números entre 1 e 10, sendo 1 o melhor caso e 10 o pior caso, para cada um dos parâmetros (Severidade, Ocorrência e Detecção).

No FMEA tradicional, o sistema de classificação NPR é usado para avaliar o nível de risco das falhas, para classificar as falhas e, assim, priorizar ações a serem tomadas (KUMRU et al., 2013).

2.2.3.1. Severidade de Falha

Segundo Araújo (2008), “o índice Severidade (S) é um indicador do impacto do efeito que um modo de potencial trará aos consumidores e à própria empresa, caso esta falha ocorra”.

Como dito anteriormente, os índices são avaliados com notas de 1 a 10. Existem diversas parametrizações desses valores. A tabela 1 demonstra um exemplo de parametrização:

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

Tabela 1 - Pontuação de Severidade (TERNINKO, 2003* apud AGUIAR et al., 2009)

2.2.3.2. Ocorrência de Falha

De acordo com Araújo (2008) “o índice Ocorrência é utilizado para identificar a frequência com que uma falha ocorre para cada uma das causas”. Este índice pode ser representado por sua confiabilidade matemática, através das frequências previstas ou usar um número acumulativo de falhas por 100 ou 1000 componentes sobre a vida do produto em questão.

A seguir temos um exemplo de parametrização do índice de Ocorrência demonstrado em uma tabela:

* TERNINKO, J. *Reliability / Mistake-proofing Using Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*. ASQ's Annual Quality Congress, 2003.

Critério	Pontuação	Razão da Possibilidade de Ocorrência da Falha
Chance Remota	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
Catastrófica	10	1/2

Tabela 2 - Pontuação da Ocorrência por Probabilidade de Ocorrência
(CHANG et al., 2001* apud AGUIAR et al., 2009)

2.2.3.3. Detecção de Falha

Já com relação ao índice detecção da falha, Araújo (2008) o caracteriza como a “habilidade de testes e de inspeções de planejamento em remover os defeitos ou em detectar tais modos de falhas”.

Um exemplo de parametrização deste índice é representado na tabela 3:

Detecção	Probabilidade de Detecção da Causa da Falha	Pontuação
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

Tabela 3 – Pontuação de Detecção (LEAL et al., 2005** apud AGUIAR et al., 2009)

* CHANG, C. L.; LIU, P. H.; WEI, C. C. *Failure mode and effects analysis using grey theory. Integrated Manufacturing systems.* v. 12, 2001.

** 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, 2005.

2.2.4. Limitações do FMEA

Como citado anteriormente, a dificuldade em determinar com precisão a ocorrência de uma falha e a não consideração das interrelações entre os diversos modos de falha em uma análise FMEA está entre as principais críticas a esta ferramenta. A seguir enumera-se algumas críticas ao FMEA:

- Por simplificação, os três fatores possuem a mesma ponderação na avaliação (CHANG et al., 2010 apud KUMRU et al., 2013). A interrelação entre os fatores não é considerada. Ou seja, nessa técnica assume-se que os três fatores são igualmente importantes. Isto não condiz com uma aplicação prática do processo FMEA (PILLAY et al., 2003^{*} apud KUMRU et al., 2013);
- Os elementos NPR têm muitos números duplicados (CHANG et al., 2010 apud KUMRU et al., 2013). O método que a análise FMEA usa para se chegar à classificação de risco é criticamente debatida. O objetivo da classificação de risco é atribuir os recursos limitados para os itens com riscos mais graves. É comum encontrar valores NPR iguais, o que levaria a uma análise errônea, pois a implicação do risco pode ser totalmente diferente. Por exemplo, considere dois eventos com os valores 3, 5, 2 e 2, 3, 5, respectivamente para Severidade, Ocorrência e Detecção. Nos dois casos o NPR será o mesmo, 30, no entanto, as implicações desses eventos não necessariamente serão as mesmas. Isto pode implicar em desperdício de recursos e tempo ou até mesmo um evento com alto grau de risco passar despercebido (PILLAY et al., 2003 apud KUMRU et al., 2013);
- A escala NPR possui algumas propriedades estatísticas não intuitivas. Ela é derivada apenas de três fatores, principalmente em termos de segurança. Além disso, o método NPR convencional não considera as relações indiretas entre componentes (CHANG et al., 2010 apud KUMRU et al., 2013);

Ao realizar um FMEA com fins de avaliar a segurança, não se deve forçar a precisão onde os dados são escassos e não confiáveis (CHANG et al., 2010 apud KUMRU et al., 2013). Ou seja, pedir a um analista ou especialista para atribuir notas entre 1 e 10 para diferentes fatores considerados produziria uma impressão falsa e irreal.

* PILLAY, A.; WANG, J. *Modified Failure Mode and Effects Analysis Using Approximate Reasoning*. Reliability and System Safety, 2003.

Embora isso simplifique o cálculo, pode-se causar problemas. As relações entre probabilidades e fatores são diferentes (linear ou não linear) (KUMRU et al., 2013).

2.3. Lógica Fuzzy

2.3.1. Contextualização do Uso da Lógica Fuzzy

De acordo com Chin et al. (2008), na fase do projeto conceitual, os desenvolvedores de produto enfrentam diversas incertezas com relação aos requisitos e atributos, tais como, materiais, características, tamanhos e performance funcional que o novo produto terá. As decisões tomadas nessa fase têm impacto significativo no custo do produto final. Quando Venter et al. (2008) aplicou a teoria dos conjuntos *fuzzy* para modelar a incerteza em projeto de aeronaves, ele descobriu que essa técnica era mais eficiente do que a de projeto determinista tradicional (em livre tradução de “*traditional deterministic design*”) que usa um fator de correção para tratar a incerteza. Já Xu et al. (2002), apresentou um método baseado em lógica *fuzzy* para resolver a questão das interdependências entre os vários modos de falha com informações imprecisas e incertas derivadas da técnica de análise FMEA.

Muitas decisões e resoluções de problemas tornam-se difíceis de serem compreendidas qualitativamente. Porém, as pessoas obtêm sucesso usando o conhecimento impreciso, ao invés do preciso. A teoria dos conjuntos *fuzzy*, introduzido por Lotfi Zadeh (1965), assemelha-se à razão humana na utilização de informações e incerteza para gerar decisões aproximadas. Essa teoria deu base para o desenvolvimento da lógica *fuzzy*, através da representação matemática da incerteza e imprecisão e de ferramentas que tratam a imprecisão intrínseca em muitos problemas. Assim, é notável o potencial do uso da teoria dos conjuntos *fuzzy* para melhorar a performance do FMEA (CHIN et al., 2008).

2.3.2. Visão Geral da Lógica Fuzzy

A lógica *fuzzy* é derivada da teoria dos conjuntos *fuzzy* com o objetivo de lidar com o raciocínio aproximado. As variáveis na lógica *fuzzy* podem assumir valores entre 0 e 1, incluindo o 0 e o 1. Ou seja, o grau de verdade de uma afirmação pode variar entre 0 e 1 (onde 1-verdade e 0-falso) como na lógica proposicional clássica. Assim, a lógica *fuzzy* fornece uma base para o raciocínio aproximado, isto é, um raciocínio que não é totalmente exato ou totalmente inexato. Logo, ela fornece um quadro mais realista para o raciocínio humano quando compara a lógica tradicional de dois valores (KUMRU et al., 2013).

O termo “lógica *fuzzy*” surgiu a partir do desenvolvimento da teoria dos conjuntos *fuzzy* por Lotfi Zadeh (1965). Primeiro Zadeh propôs a teoria dos conjuntos *fuzzy* e, depois, estabeleceu a lógica *fuzzy* com base nos conjuntos *fuzzy*. O processo de inferência *fuzzy* é demonstrado na figura 3:

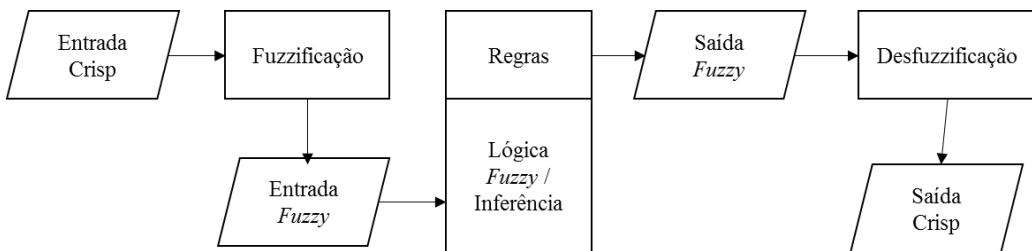


Figura 3 - Processo de Inferência Fuzzy (KUMRU et al., 2013)

Segundo Kumru et al. (2013), a inferência *fuzzy* possui um algoritmo que pode ser descrito nos seguintes passos:

1. Definir as variáveis linguísticas e os termos (parametrização);
2. Construir as funções de pertinência (parametrização);
3. Construir a base de regras (parametrização);
4. Converter os dados de entrada *crisp* para valores *fuzzy* usando as funções de pertinência (“fuzzificação”);
5. Parametrizar as regras na base de regras (inferência);
6. Combinar os resultados de cada regra (agregação);
7. Converter os dados de saída para valores não-*fuzzy* (“defuzzificação”).

As variáveis de entrada e saída do sistema são chamadas de variáveis linguísticas, pois seus valores são palavras ou frases em certo idioma e não valores numéricos. Geralmente, são decompostas em um conjunto de termos linguísticos.

As funções de pertinência são utilizadas nos passos de “fuzzificação” e “defuzzificação” de um sistema de lógica *fuzzy*, com o intuito de transformar os valores de entrada não-*fuzzy* em termos linguísticos e vice-versa. Assim, a função de pertinência é utilizada para quantificar um termo linguístico. Existem diferentes tipos de função de pertinência, são elas: triangular, trapezoidal, linear por parte, Gaussiana e *singleton* (KUMRU et al., 2013).

De acordo com Kumru et al. (2013), o conceito da lógica *fuzzy* pode ser representado matematicamente da seguinte forma: Seja X um conjunto não vazio. Um conjunto *fuzzy* A em X é caracterizado pela função pertinência $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ e $\mu_A(x)$ é interpretado como o grau de pertinência do elemento x no conjunto *fuzzy* \tilde{A} para cada $x \in X$. Assim, $\tilde{A} = ((u, \mu_A(u)) / u \in X)$. Geralmente, usa-se $\tilde{A}(x)$ em vez de $\mu_A(x)$. A família de todos os conjuntos *fuzzy* em X é denotada por $F(X)$.

Se $X = (x_1, \dots, x_n)$ é um conjunto finito e \tilde{A} é um conjunto *fuzzy* em X , então usa-se, geralmente, a seguinte notação:

$$\tilde{A} = \frac{\mu_1}{x_1} + \dots + \frac{\mu_n}{x_n} \quad (2)$$

Onde μ_i/x_i , $i = 1, \dots, n$, significa que μ_i é o grau de pertinência de x_i em \tilde{A} e o sinal de mais representa a união.

Vamos exemplificar com uma função de pertinência triangular:

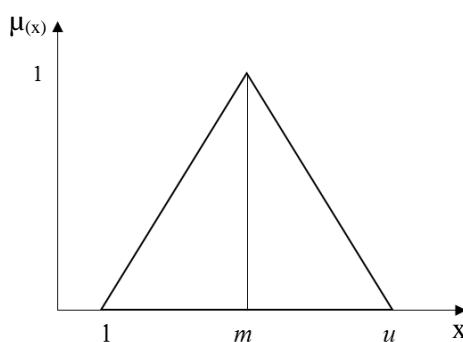


Figura 4 – Número Fuzzy Triangular

O conjunto *fuzzy* \tilde{A} representado é chamado de número *fuzzy* triangular com centro m , largura esquerda $l > 0$ e largura direita $u > 0$ se a função de pertinência for da seguinte maneira:

$$\tilde{A}(x) = \begin{cases} 1 - (m - x)/l & \text{se } l \leq x \leq m \\ 1 - \frac{l-x}{u} & \text{se } m \leq x \leq u \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

E usamos a notação $\tilde{A} = (l, m, u)$. Além disso, um número *fuzzy* triangular com centro em m pode ser visto como uma quantidade *fuzzy* “ x aproximadamente igual a m ”.

Em um sistema de inferência *fuzzy*, uma base de regras é criada para controlar a variável de saída. Uma regra *fuzzy* é simplesmente uma regra “Se-Então”, que possui uma condição e consequência. Depois de avaliar o resultado de cada regra, os resultados devem ser combinados a fim de obter um resultado final. Este processo é chamado de inferência *fuzzy*. Os resultados podem ser combinados de diferentes maneiras: por máximo, por soma limitada ou por soma normalizada. Dependendo da forma do consequente, existem dois tipos principais de modelos *fuzzy*, segundo Babuška (2012* apud KUMRU et al., 2013), baseados em regras:

1. Modelo *fuzzy* linguístico Mamdani: Tanto o antecedente como o consequente são preposições *fuzzy*;
2. Modelo *fuzzy* Takagi-Sugeno: O antecedente é uma preposição *fuzzy* e o consequente é uma função polinomial *crisp*.

A técnica de inferência mais usada em problemas de tomada de decisão é o Método Mamdani (MAMDANI, 1977).

Depois da inferência, o resultado geral é um valor *fuzzy*. Este resultado deve ser “defuzzificado” para obter uma saída *crisp* final. A “defuzzificação” é feita considerando a forma da função de pertinência da variável de saída. Há diferentes tipos de operadores de “defuzzificação”, são eles: Centro de Gravidade (CG), Centro de Gravidade para *Singlets*, Centro de Área, *Left Most Maximum* e *Right Most Maximum*. Dentre essas técnicas, a mais utilizada é a do Centro de Gravidade. Esta técnica consiste em encontrar os pontos que cruzam a reta que divide a área em duas massas iguais.

* BABUŠKA, R. *Fuzzy System, Information and Control*. 2010.

O método de “defuzzificação” do centroide encontra um ponto que representa o centro de gravidade do conjunto $fuzzy \tilde{A}$ no intervalo (l,u) .

No problema a ser estudado, uma base de regras *fuzzy* tem como objetivo classificar as potenciais causas identificadas no FMEA, que teria os mesmos NPR's, porém com diferentes aplicações de risco. Assim, a lógica *fuzzy* permite aprofundar a análise incluindo fatores de ponderação para os fatores Severidade, Ocorrência e Detecção com o uso de regras de decisão.

2.3.3. Aplicação da Inferência *Fuzzy* ao FMEA

A figura 5 mostra uma visão global da proposta do sistema de avaliação *fuzzy* FMEA, onde há três passos principais para realizar essa avaliação, são eles: “fuzzificação”, avaliação de regras e “defuzzificação”.

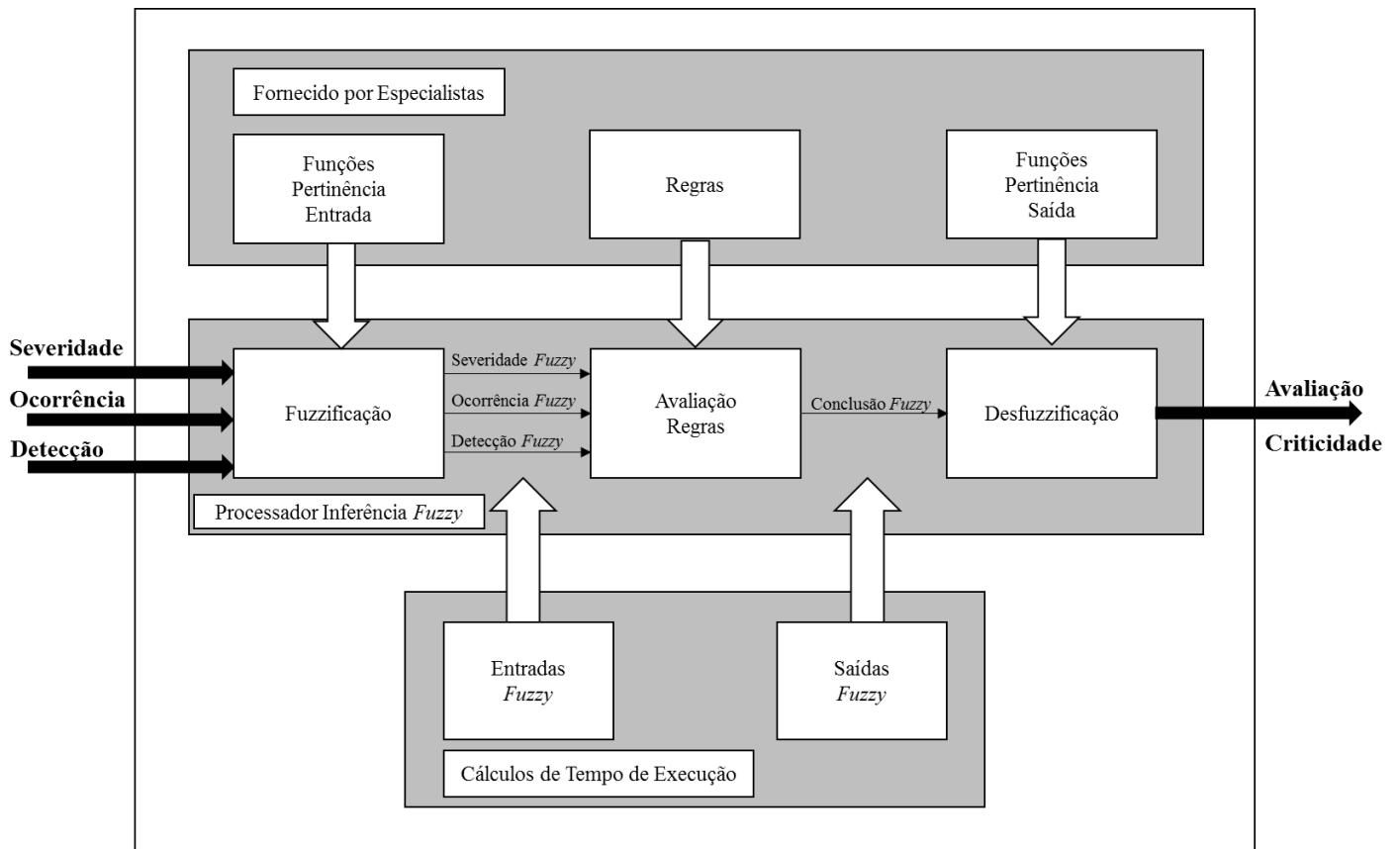


Figura 5 - Visão Geral do Sistema de Avaliação Crítica *Fuzzy* (CHIN et al., 2008)

A seguir Chin et al. (2008) descreve a imagem explicando o passo a passo de cada etapa desse sistema:

Primeiramente, o sistema utiliza variáveis linguísticas para descrever a severidade, probabilidade de ocorrência e a dificuldade de detecção. Em seguida, estas entradas são “fuzzificadas” para determinar o grau de pertinência de cada classe de entrada. O resultado, as chamadas entradas *fuzzy*, são avaliadas utilizando uma base de regras linguísticas e operações *fuzzy* para, assim, obter uma classificação do grau de risco do modo de falha e um grau de pertinência associado à classe de risco. Por fim, as saídas *fuzzy* são “defuzzificadas” para obter o nível de priorização para o modo de falha.

O processo de “fuzzificação” converte a severidade, a probabilidade de ocorrência e a dificuldade de detecção em representações *fuzzy* que podem ser combinadas com as regras estabelecidas na base de regras. As escalas e as funções de pertinência identificam a gama de valores de entrada correspondentes a cada rótulo linguístico *fuzzy*.

A base de regras descreve o grau de risco para cada combinação das variáveis de entrada. Essa base consiste nas interações entre os diversos modos de falha e os efeitos, que são representados na forma de regras *fuzzy* “Se-Então”. Tais regras, geralmente, são formuladas mais em termos linguísticos do que em numéricos. Essas regras “Se-Então” possuem duas partes: um antecedente, que é comparado com os *inputs*, e uma consequente, que é o resultado. Por exemplo, se uma regra *fuzzy* “Se-Então” tem a forma “se X é A então Y é B”, A e B são valores linguísticos definidos por conjuntos *fuzzy* nas gamas X e Y (universos de discurso). A parte “se X é A” é chamada de antecedente, enquanto que “então Y é B” é chamado de consequente. O antecedente retorna um único número ($\mu_{A(x)}$) entre 0 e 1, já o consequente atribui a todo conjunto *fuzzy* B a variável de saída Y.

Na prática, a imprecisão dos antecedentes elimina a necessidade de uma correspondência exata com as entradas. Se o antecedente é verdadeiro até certo grau de pertinência, então o consequente também é verdadeiro no mesmo grau. Isto é, cada regra é encontrada para ser uma função do grau em que seu antecedente corresponde nas entradas. Isso possibilita a combinação de várias avaliações qualitativas, podendo até várias regras serem ativadas ao mesmo tempo. Desta maneira, FMEA e as regras *fuzzy*, que descrevem as relações entre modos de falha e efeitos, podem ser combinados. Este

relacionamento impreciso fornece uma base para interpolação entre possíveis estados de entrada e minimiza o número de regras necessárias para descrever a relação entrada-saída. Um exemplo de base de regras é mostrado a seguir:

Se Severidade é “alta”, Ocorrência é “moderada” e Detecção é “baixa”, Então o risco é “muito importante”.

Muitas vezes, a experiência e o conhecimento humano podem ser representados por meio das regras *fuzzy* “Se-Então”, o que justifica a importância de tais regras. Na análise de criticidade *fuzzy*, o sistema representa a seriedade de uma falha através da Severidade, a probabilidade de falha através da Ocorrência e o quanto difícil é detectar a falha através da Detecção. Regras baseadas nesses tipos de variáveis linguísticas são mais expressivas e naturais do que quando comparadas com o NPIR e com a criticidade dos cálculos numéricos. Além disso, as regras permitem combinar dados quantitativos, como a probabilidade de falha, com dados subjetivos e qualitativos (Severidade e Detecção) de uma maneira uniforme.

O processo de inferência *fuzzy* usa a “inferência min-max” para calcular as conclusões da regra baseada nos valores de entrada do sistema. O resultado desse processo é chamado de “conclusão *fuzzy*”. O “valor verdade”, ou aplicabilidade, de uma regra é determinado a partir da conjunção de seus antecedentes. Por exemplo, se a conjunção é definida como “mínima”, então a avaliação de regra consiste em determinar o menor antecedente (mínimo), que é considerado o valor verdade da regra. Esse valor verdade será aplicado em todas as consequências da regra. Se um *output fuzzy* é consequência de mais de uma regra, ele é definido como valor verdade mais elevado (máximo) de todas as regras que o incluem como uma consequência. O resultado da avaliação da regra é um conjunto de conclusões *fuzzy* que refletem os efeitos de todas as regras cujo o valor verdade é maior que zero.

O processo de “defuzzificação” cria um *ranking* da conclusão *fuzzy* que expressa o grau de risco do projeto, o que permite a priorização de ações corretivas e revisões do projeto. Este processo é necessário, pois decifra o significado da conclusão *fuzzy* e seus valores. Além disso, o processo de “defuzzificação” resolve conflitos entre diferentes resultados que podem ter surgidos durante a avaliação de regra.

Muitos algoritmos de “defuzzificação” foram desenvolvidos, mas não existe um que seja o melhor para todas as aplicações. O algoritmo “centro de gravidade”, um dos

algoritmos mais usados, retorna a média ponderada dos valores de apoio que se apliquem a atingir seu valor máximo:

$$CG = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i(x) \cdot x_i}{\sum_{i=1}^N \mu_i(x)} \quad (4)$$

Onde:

N = número de pontos de discretização do conjunto *fuzzy* de saída;

x_i = o valor de suporte em que a função de membro i atinge o seu valor máximo;

$\mu_i(x)$ = o grau de pertinência da função;

CG = o centro de gravidade das conclusões.

2.3.4. Benefícios do Uso da Lógica *Fuzzy* aliada ao FMEA

Segundo Kumru et al. (2013), as vantagens da utilização das regras *fuzzy* aliada com a análise FMEA são listadas a seguir:

- Fornece um método organizado que permite combinar conhecimento especializado e experiência em um estudo FMEA. A relação entre NPR e os parâmetros Severidade, Ocorrência e Detecção deixa de ser considerada linear, como no modelo convencional de NPR, para ser considerada uma relação não linear;
- O uso de termos linguísticos permite aos avaliadores atribuir valores mais significativos aos fatores considerados e, assim, melhorar a eficácia da análise FMEA. Isso acaba garantindo que eventos com baixo NPR não sejam esquecidos e analisados quando são abordados por prioridade de atenção;
- A flexibilidade de atribuir pesos aos fatores, fornece um meio específico de identificar pontos fracos nos componentes e/ou sistemas (PILLAY et al., 2003 apud KUMRU et al., 2013);
- As combinações dos fatores de entrada (O, S e D) são modeladas. Por exemplo, uma falha só terá um NPR elevado se esta possuir uma determinada combinação dos fatores O, S e D, que são descritas pelas regras Se-Então. Isto soluciona situações em que o NPR não reflete o verdadeiro risco da falha;

- Técnicas de inferência *fuzzy* podem incorporar o conhecimento humano, especializado ou não, o qual a informação é descrita por afirmações vagas e imprecisas durante um processo de modelagem. O comportamento das técnicas de inferência *fuzzy* são expressos em uma linguagem na qual as pessoas consigam facilmente interpretá-las. Assim, os usuários do FMEA conseguem personalizar o modelo NPR de uma maneira simples e fácil (TAY et al., 2006* apud KUMRU et al., 2013).

FMEA é uma técnica de avaliação de risco amplamente utilizada para identificar os possíveis modos de falha de um produto ou processo. A classificação das prioridades para ações corretiva, de acordo com os efeitos de cada falha, pode diminuir ou eliminar a chance de que a falha ocorra. No entanto, em uma análise FMEA convencional pode haver diversas dificuldades, como por exemplo, descrição subjetiva e qualitativa em linguagem comum, a importância relativa entre as classificações de risco, a diferença da representação de risco entre classificações iguais e o compartilhamento de conhecimentos entre a equipe de membros incumbidos do FMEA. Logo, a proposta de avaliação de risco com base na teoria *fuzzy* vem para lidar com essas dificuldades (KUMRU et al., 2013).

* TAY, K.M.; LIM, C. P. *Application of Fuzzy Inference Techniques to FMEA*. Advances in Intelligent and Soft Computing, 2006.

3. Parametrização de um Sistema Fuzzy FMEA

3.1. Definição das Variáveis de Entrada e Saída

Por tratar-se de uma análise FMEA, os especialistas consultados (grupo composto pelo autor do presente trabalho, um professor doutor e um mestre no assunto em questão) determinaram que as variáveis de entrada (*inputs*) fossem igualmente definidas, à análise FMEA tradicional: Severidade, representando o impacto de um determinado modo de falha no componente ou processo em análise; Ocorrência, representando a frequência com que um modo de falha ocorre; e Detecção, representando a dificuldade em diagnosticar um modo de falha.

A variável de saída em questão, será também igual à análise FMEA tradicional: NPR (Número de Prioridade de Risco), o qual determina o nível de risco que uma certa falha representa ao componente ou processo a serem analisados.

3.2. Definição dos Termos Linguísticos

A fim de elaborar um sistema *fuzzy* FMEA padrão, para que este sirva de base para diversas análises e facilite eventuais alterações de acordo com necessidades específicas de problemas, os especialistas parametrizaram as variáveis de entrada com o mesmo número e denominação de termos linguísticos. Assim, os *inputs* serão representados em termos linguísticos da seguinte forma:

Variáveis de Entrada	Termos Linguísticos Adotados				
Severidade	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Ocorrência	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Detecção	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto

Tabela 4 - Variáveis de Entrada e Seus Termos Linguísticos

Já com relação à variável de saída, o Número de Prioridade de Risco, foi determinado pelos especialistas que o ideal seria utilizar um número de termos maior

que o utilizado nos valores de entrada (5 termos linguísticos), a fim de obter-se uma análise mais eficaz e uma classificação bem distribuída ao longo da gama de possíveis valores para a variável em questão. Isso é justificado através de um número maior de resultados possíveis, que aumenta possibilidade de obter-se valores com diferenciações maiores e, assim, permitindo uma análise mais eficaz dos números obtidos de NPR no sistema elaborado. Portanto, os especialistas parametrizaram a variável de saída (NPR) com 7 termos linguísticos:

Variável de Saída	Termos Linguísticos Adotados							
NPR	Muito Baixo	Baixo	Médio Baixo	Médio	Médio Alto	Alto	Muito Alto	

Tabela 5 - Variável de Saída e Seus Termos Linguísticos

3.3. Desenvolvimento do Sistema *Fuzzy FMEA* no fuzzyTECH

3.3.1. Apresentação do fuzzyTECH

A ferramenta escolhida para a implementação do sistema *fuzzy FMEA* a ser criado foi o fuzzyTECH, especificamente a versão fuzzyTECH 6.10b Professional Edition, com a licença de uso fornecida pela Universidade de São Paulo para fins de estudo.

Essa ferramenta apresenta uma interface gráfica bem intuitiva que estimula um processo de desenvolvimento rápido e eficiente do sistema *fuzzy*. Isto permite que o usuário possua uma flexibilidade para interagir com o sistema e buscar o desenvolvimento e implementação desde modelos mais simples até os mais complexos.

3.3.2. Desenvolvimento das Funções de Pertinência

As funções de pertinência das variáveis de entrada foram igualmente determinadas, tanto a morfologia dos números *fuzzy* quanto seus respectivos valores. Para todos os termos linguísticos, os especialistas parametrizaram as funções de

pertinência em números *fuzzy* triangulares por se adequarem melhor às características das variáveis em questão. Assim, as funções de pertinência com seus respectivos termos linguísticos e valores *fuzzy* foram definidas da seguinte forma:

Critérios	Parâmetros Usados												
Severidade	Números <i>fuzzy</i> triangulares												
	Muito Baixo		Baixo			Médio			Alto			Muito Alto	
	$l_{mb}=m_{mb}$	u_{mb}	l_b	m_b	u_b	l_m	m_m	u_m	l_a	m_a	u_a	l_{ma}	$m_{ma}=u_{ma}$
	1,00	3,25	1,00	3,25	5,50	3,25	5,50	7,75	5,50	7,75	10,00	7,75	10,00
Ocorrência	Números <i>fuzzy</i> triangulares												
	Muito Baixo		Baixo			Médio			Alto			Muito Alto	
	$l_{mb}=m_{mb}$	u_{mb}	l_b	m_b	u_b	l_m	m_m	u_m	l_a	m_a	u_a	l_{ma}	$m_{ma}=u_{ma}$
	1,00	3,25	1,00	3,25	5,50	3,25	5,50	7,75	5,50	7,75	10,00	7,75	10,00
Detecção	Números <i>fuzzy</i> triangulares												
	Muito Baixo		Baixo			Médio			Alto			Muito Alto	
	$l_{mb}=m_{mb}$	u_{mb}	l_b	m_b	u_b	l_m	m_m	u_m	l_a	m_a	u_a	l_{ma}	$m_{ma}=u_{ma}$
	1,00	3,25	1,00	3,25	5,50	3,25	5,50	7,75	5,50	7,75	10,00	7,75	10,00

Tabela 6 – Parâmetros Utilizados para as Variáveis de Entrada

A seguir estão representados a funções de pertinência desenvolvidas e apresentadas no software fuzzyTECH. A figura 6 ilustra as da variável Severidade:

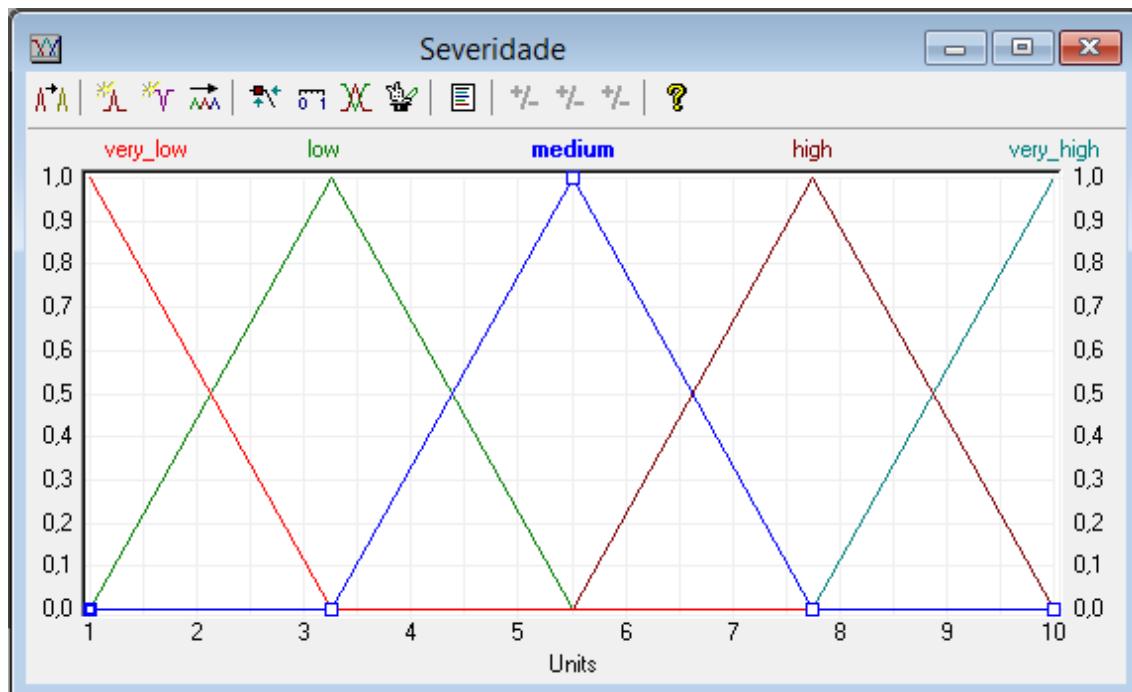


Figura 6 - Funções de Pertinência do Critério Severidade

A figura 7 ilustra as funções de pertinência da variável Ocorrência:

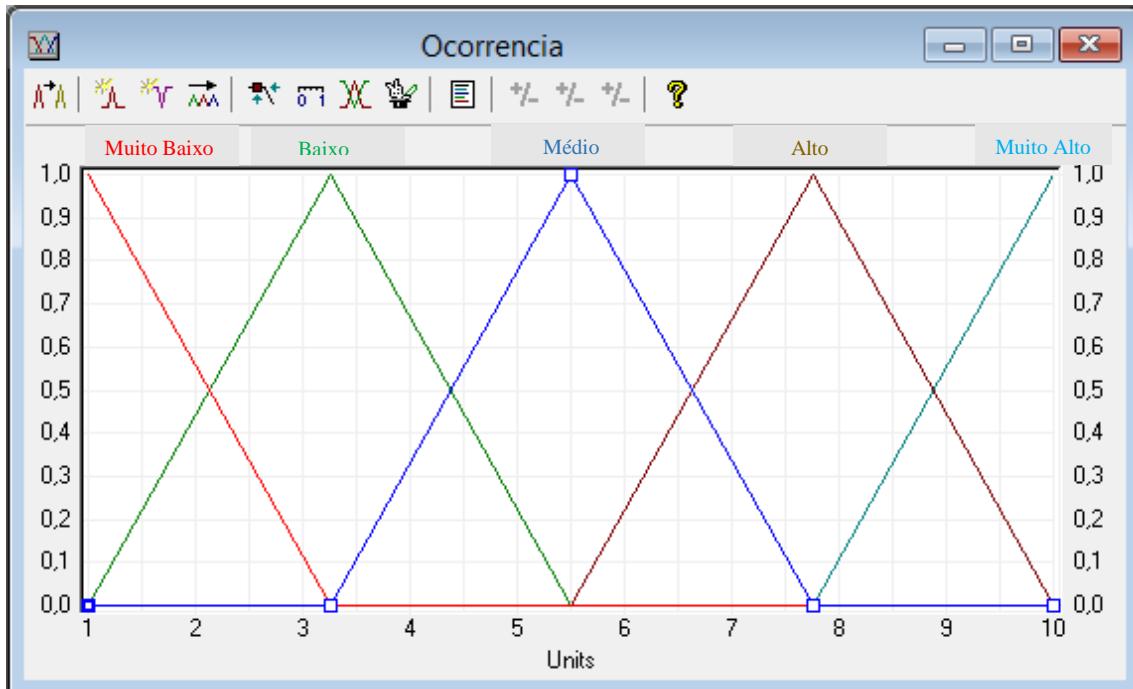


Figura 7 - Funções de Pertinência do Critério Ocorrência

A figura 8 ilustra as funções de pertinência da variável Detecção:

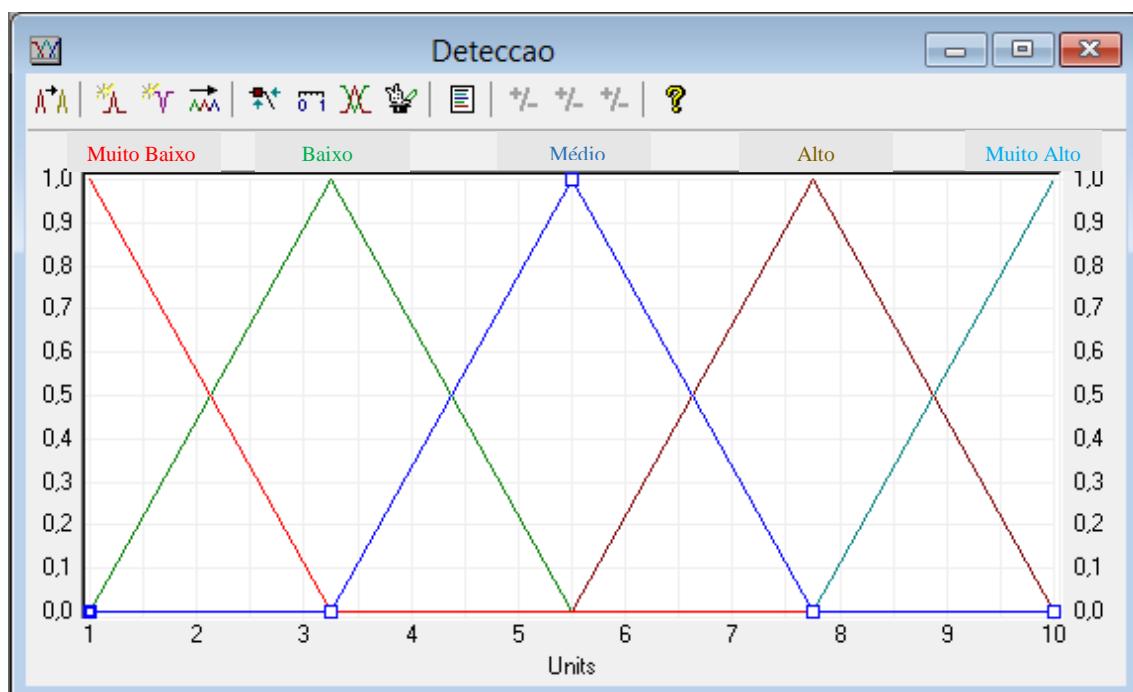


Figura 8 - Funções de Pertinência do Critério Detecção

Com relação a variável de saída, o Número de Prioridade de Risco (NPR), que tem como função classificar o risco de cada conjunto de critérios, foram adotadas 7 funções de pertinência como explicado na subseção 3.2. Os especialistas optaram por funções de pertinência em números *fuzzy* triangulares simetricamente distribuídas ao longo dos valores possíveis, pois trata-se do modelo mais simples em uma análise e o que se adequa a um maior número de casos. As funções de pertinência podem assumir diferentes formas, assim, é necessário que haja uma análise prévia de qual forma se adequa melhor ao problema a ser analisado. Os valores assumidos variaram de 1 a 1000, com o intuito de comparar com o FMEA tradicional em uma análise posterior. Assim, as funções de pertinência com seus respectivos termos linguísticos e valores *fuzzy* foram definidas conforme a tabela 7:

NPR	Números <i>fuzzy</i> triangulares											
	Muito Baixo			Baixo			Médio Baixo			Médio		
	$l_{mb}=m_{mb}$	u_{mb}	l_b	m_b	u_b	l_{mdb}	m_{mdb}	u_{mdb}	l_m	m_m	u_m	
	1,00	167,50	1,00	167,50	334,00	167,50	334,00	500,50	334,00	500,50	667,00	
	Médio Alto			Alto			Muito Alto					
	l_{mda}	m_{mda}	u_{mda}	l_a	m_a	u_a	l_{ma}	$m_{ma}=u_{ma}$				
	500,50	667,00	833,50	667,00	833,50	1000,00	833,50	1000,00				

Tabela 7 - Parâmetros Utilizados para a Variável de Saída

A seguir estão representados a funções de pertinência desenvolvidas e apresentadas no software fuzzyTECH para a variável de saída (NPR):

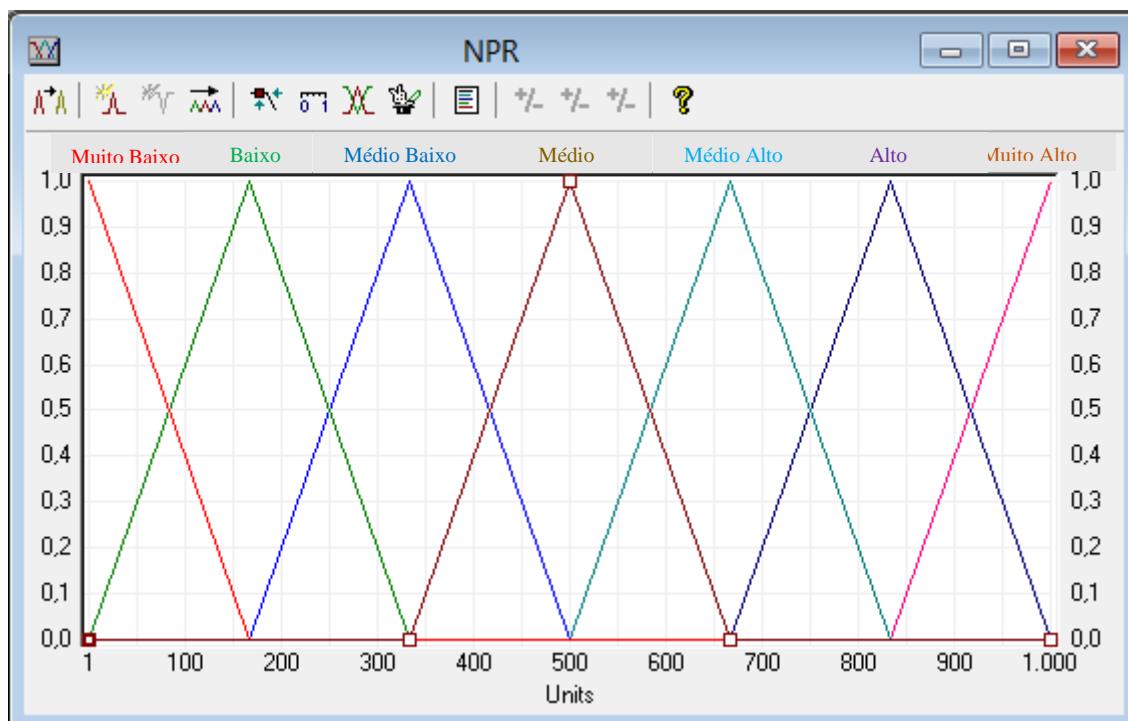


Figura 9 - Funções de Pertinência do Número de Prioridade de Risco

3.3.3. Desenvolvimento da Base de Regras

Depois de determinar as funções de pertinência para cada uma das variáveis do sistema, os especialistas consultados parametrizaram a base de regras de inferência, que segue abaixo:

Regra	Se Severidade	E Ocorrência	E Detecção	Operador Prod/Max	Então NPR
1	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO	=>	MUITO BAIXO
2	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO	BAIXO	=>	MUITO BAIXO
3	MUITO BAIXO	BAIXO	MUITO BAIXO	=>	MUITO BAIXO
4	BAIXO	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO	=>	MUITO BAIXO
5	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO	MÉDIO	=>	BAIXO
6	MUITO BAIXO	MÉDIO	MUITO BAIXO	=>	BAIXO
7	MÉDIO	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO	=>	BAIXO
8	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO	ALTO	=>	BAIXO
9	MUITO BAIXO	BAIXO	BAIXO	=>	BAIXO
10	MUITO BAIXO	ALTO	MUITO BAIXO	=>	BAIXO
11	BAIXO	MUITO BAIXO	BAIXO	=>	BAIXO
12	BAIXO	BAIXO	MUITO BAIXO	=>	BAIXO
13	ALTO	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO	=>	BAIXO
14	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO	MUITO ALTO	=>	BAIXO
15	MUITO BAIXO	MUITO ALTO	MUITO BAIXO	=>	BAIXO
16	MUITO ALTO	MUITO BAIXO	MUITO BAIXO	=>	BAIXO
17	MUITO BAIXO	BAIXO	MÉDIO	=>	BAIXO
18	MUITO BAIXO	MÉDIO	BAIXO	=>	BAIXO
19	BAIXO	MUITO BAIXO	MÉDIO	=>	BAIXO
20	BAIXO	MÉDIO	MUITO BAIXO	=>	BAIXO
21	MÉDIO	MUITO BAIXO	BAIXO	=>	BAIXO
22	MÉDIO	BAIXO	MUITO BAIXO	=>	BAIXO
23	MUITO BAIXO	BAIXO	ALTO	=>	MÉDIO BAIXO
24	MUITO BAIXO	ALTO	BAIXO	=>	MÉDIO BAIXO
25	BAIXO	MUITO BAIXO	ALTO	=>	MÉDIO BAIXO
26	BAIXO	BAIXO	BAIXO	=>	MÉDIO BAIXO
27	BAIXO	ALTO	MUITO BAIXO	=>	MÉDIO BAIXO
28	ALTO	MUITO BAIXO	BAIXO	=>	MÉDIO BAIXO
29	ALTO	BAIXO	MUITO BAIXO	=>	MÉDIO BAIXO
30	MUITO BAIXO	MÉDIO	MÉDIO	=>	MÉDIO BAIXO
31	MÉDIO	MUITO BAIXO	MÉDIO	=>	MÉDIO BAIXO
32	MÉDIO	MÉDIO	MUITO BAIXO	=>	MÉDIO BAIXO
33	MUITO BAIXO	BAIXO	MUITO ALTO	=>	MÉDIO BAIXO
34	MUITO BAIXO	MUITO ALTO	BAIXO	=>	MÉDIO BAIXO
35	BAIXO	MUITO BAIXO	MUITO ALTO	=>	MÉDIO BAIXO
36	BAIXO	MUITO ALTO	MUITO BAIXO	=>	MÉDIO BAIXO

37	MUITO ALTO	MUITO BAIXO	BAIXO	=>	MÉDIO BAIXO
38	MUITO ALTO	BAIXO	MUITO BAIXO	=>	MÉDIO BAIXO
39	MUITO BAIXO	MÉDIO	ALTO	=>	MÉDIO BAIXO
40	MUITO BAIXO	ALTO	MÉDIO	=>	MÉDIO BAIXO
41	BAIXO	BAIXO	MÉDIO	=>	MÉDIO BAIXO
42	BAIXO	MÉDIO	BAIXO	=>	MÉDIO BAIXO
43	MÉDIO	MUITO BAIXO	ALTO	=>	MÉDIO BAIXO
44	MÉDIO	BAIXO	BAIXO	=>	MÉDIO BAIXO
45	MÉDIO	ALTO	MUITO BAIXO	=>	MÉDIO BAIXO
46	ALTO	MUITO BAIXO	MÉDIO	=>	MÉDIO BAIXO
47	ALTO	MÉDIO	MUITO BAIXO	=>	MÉDIO BAIXO
48	MUITO BAIXO	MÉDIO	MUITO ALTO	=>	MÉDIO
49	MUITO BAIXO	MUITO ALTO	MÉDIO	=>	MÉDIO
50	MÉDIO	MUITO BAIXO	MUITO ALTO	=>	MÉDIO
51	MÉDIO	MUITO ALTO	MUITO BAIXO	=>	MÉDIO
52	MUITO ALTO	MUITO BAIXO	MÉDIO	=>	MÉDIO
53	MUITO ALTO	MÉDIO	MUITO BAIXO	=>	MÉDIO
54	MUITO BAIXO	ALTO	ALTO	=>	MÉDIO
55	BAIXO	BAIXO	ALTO	=>	MÉDIO
56	BAIXO	ALTO	BAIXO	=>	MÉDIO
57	ALTO	MUITO BAIXO	ALTO	=>	MÉDIO
58	ALTO	BAIXO	BAIXO	=>	MÉDIO
59	ALTO	ALTO	MUITO BAIXO	=>	MÉDIO
60	BAIXO	MÉDIO	MÉDIO	=>	MÉDIO
61	MÉDIO	BAIXO	MÉDIO	=>	MÉDIO
62	MÉDIO	MÉDIO	BAIXO	=>	MÉDIO
63	MUITO BAIXO	ALTO	MUITO ALTO	=>	MÉDIO
64	MUITO BAIXO	MUITO ALTO	ALTO	=>	MÉDIO
65	BAIXO	BAIXO	MUITO ALTO	=>	MÉDIO
66	BAIXO	MUITO ALTO	BAIXO	=>	MÉDIO
67	ALTO	MUITO BAIXO	MUITO ALTO	=>	MÉDIO
68	ALTO	MUITO ALTO	MUITO BAIXO	=>	MÉDIO
69	MUITO ALTO	MUITO BAIXO	ALTO	=>	MÉDIO
70	MUITO ALTO	BAIXO	BAIXO	=>	MÉDIO
71	MUITO ALTO	ALTO	MUITO BAIXO	=>	MÉDIO
72	BAIXO	MÉDIO	ALTO	=>	MÉDIO
73	BAIXO	ALTO	MÉDIO	=>	MÉDIO
74	MÉDIO	BAIXO	ALTO	=>	MÉDIO
75	MÉDIO	ALTO	BAIXO	=>	MÉDIO
76	ALTO	BAIXO	MÉDIO	=>	MÉDIO
77	ALTO	MÉDIO	BAIXO	=>	MÉDIO
78	MUITO BAIXO	MUITO ALTO	MUITO ALTO	=>	MÉDIO
79	MUITO ALTO	MUITO BAIXO	MUITO ALTO	=>	MÉDIO
80	MUITO ALTO	MUITO ALTO	MUITO BAIXO	=>	MÉDIO
81	MÉDIO	MÉDIO	MÉDIO	=>	MÉDIO

82	BAIXO	MÉDIO	MUITO ALTO	=>	MÉDIO ALTO
83	BAIXO	MUITO ALTO	MÉDIO	=>	MÉDIO ALTO
84	MÉDIO	BAIXO	MUITO ALTO	=>	MÉDIO ALTO
85	MÉDIO	MUITO ALTO	BAIXO	=>	MÉDIO ALTO
86	MUITO ALTO	BAIXO	MÉDIO	=>	MÉDIO ALTO
87	MUITO ALTO	MÉDIO	BAIXO	=>	MÉDIO ALTO
88	BAIXO	ALTO	ALTO	=>	MÉDIO ALTO
89	ALTO	BAIXO	ALTO	=>	MÉDIO ALTO
90	ALTO	ALTO	BAIXO	=>	MÉDIO ALTO
91	MÉDIO	MÉDIO	ALTO	=>	MÉDIO ALTO
92	MÉDIO	ALTO	MÉDIO	=>	MÉDIO ALTO
93	ALTO	MÉDIO	MÉDIO	=>	MÉDIO ALTO
94	BAIXO	ALTO	MUITO ALTO	=>	MÉDIO ALTO
95	BAIXO	MUITO ALTO	ALTO	=>	MÉDIO ALTO
96	ALTO	BAIXO	MUITO ALTO	=>	MÉDIO ALTO
97	ALTO	MUITO ALTO	BAIXO	=>	MÉDIO ALTO
98	MUITO ALTO	BAIXO	ALTO	=>	MÉDIO ALTO
99	MUITO ALTO	ALTO	BAIXO	=>	MÉDIO ALTO
100	MÉDIO	MÉDIO	MUITO ALTO	=>	MÉDIO ALTO
101	MÉDIO	MUITO ALTO	MÉDIO	=>	MÉDIO ALTO
102	MUITO ALTO	MÉDIO	MÉDIO	=>	MÉDIO ALTO
103	MÉDIO	ALTO	ALTO	=>	MÉDIO ALTO
104	ALTO	MÉDIO	ALTO	=>	MÉDIO ALTO
105	ALTO	ALTO	MÉDIO	=>	MÉDIO ALTO
106	BAIXO	MUITO ALTO	MUITO ALTO	=>	ALTO
107	MUITO ALTO	BAIXO	MUITO ALTO	=>	ALTO
108	MUITO ALTO	MUITO ALTO	BAIXO	=>	ALTO
109	MÉDIO	ALTO	MUITO ALTO	=>	ALTO
110	MÉDIO	MUITO ALTO	ALTO	=>	ALTO
111	ALTO	MÉDIO	MUITO ALTO	=>	ALTO
112	ALTO	MUITO ALTO	MÉDIO	=>	ALTO
113	MUITO ALTO	MÉDIO	ALTO	=>	ALTO
114	MUITO ALTO	ALTO	MÉDIO	=>	ALTO
115	ALTO	ALTO	ALTO	=>	ALTO
116	MÉDIO	MUITO ALTO	MUITO ALTO	=>	ALTO
117	MUITO ALTO	MÉDIO	MUITO ALTO	=>	ALTO
118	MUITO ALTO	MUITO ALTO	MÉDIO	=>	ALTO
119	ALTO	ALTO	MUITO ALTO	=>	ALTO
120	ALTO	MUITO ALTO	ALTO	=>	ALTO
121	MUITO ALTO	ALTO	ALTO	=>	ALTO
122	ALTO	MUITO ALTO	MUITO ALTO	=>	MUITO ALTO
123	MUITO ALTO	ALTO	MUITO ALTO	=>	MUITO ALTO
124	MUITO ALTO	MUITO ALTO	ALTO	=>	MUITO ALTO
125	MUITO ALTO	MUITO ALTO	MUITO ALTO	=>	MUITO ALTO

Tabela 8 – Base de Regras

3.3.4. Definição dos Operadores Fuzzy do Processo de Inferência

Durante a modelagem do sistema criado com o auxílio do software fuzzyTECH, faz-se necessário escolher os operadores *fuzzy* que farão parte do processo de inferência. Essa etapa exige uma avaliação minuciosa, pois a escolha inadequada de operadores pode conduzir a resultados inadequados. Através de testes realizados a partir do fuzzyTECH, os especialistas decidiram pelos seguintes operadores:

- Para operacionalizar o conectivo “AND” e gerar as relações de implicação entre os antecedentes e consequentes nas regras de inferência anteriormente apresentadas, foi utilizado o operador “Prod”, o qual é descrito na equação 5:

$$\mu_{R_{A \rightarrow B}}(x, y) = \{\mu_A(x) * \mu_B(y)\} \quad (5)$$

- Para agregar os conjuntos *fuzzy* que são gerados na saída de cada regra de inferência ativada adotou-se o operador “Max”, o qual é descrito na equação 6:

$$AG(.) = \max(\mu_{R1}(x), \dots, \mu_{Ri}(x), \dots, \mu_{Rn}(x)) \quad (6)$$

- Para a defuzzificação dos conjuntos *fuzzy* agregados os especialistas definiram que a melhor opção seria o “Centro de Área”, o qual é descrito na equação 7:

$$CDA = \frac{\sum_{k=1}^n \mu_A(x_k)x_k}{\sum_{k=1}^n \mu_A(x_k)} \quad (7)$$

3.3.5. Representação do Sistema de Inferência Fuzzy

Na figura 10 está representada a interação entre as variáveis de entrada (Severidade, Ocorrência e Detecção), a base de regras (totalizando 125 regras de inferência) e variável de saída (Número de Prioridade de Risco) no software fuzzyTECH:

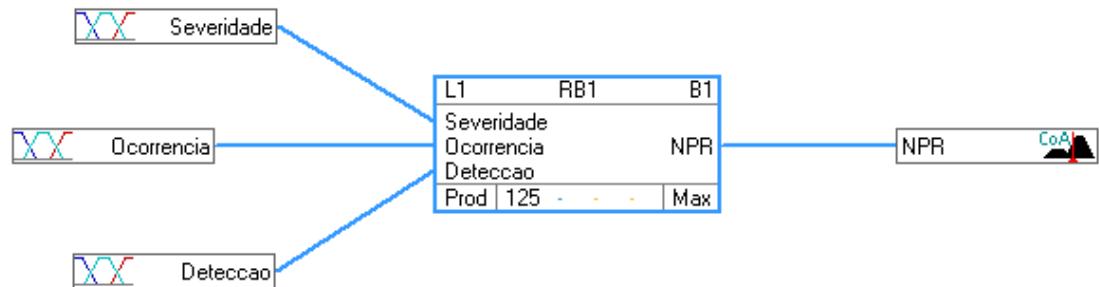


Figura 10 - Representação do Sistema de Inferência Fuzzy no fuzzyTECH

4. Estudos de Caso e Resultados

4.1. Introdução

Neste tópico foi estudado casos com o intuito de ilustrar a utilização de um Sistema de Inferência Fuzzy combinado ao FMEA. Foram estudados dois casos distintos neste presente trabalho: o primeiro caso sendo uma análise FMEA fora dos parâmetros determinados no Sistema de Inferência *Fuzzy* FMEA desenvolvido no tópico 3; e o segundo sendo um caso nos moldes do Sistema desenvolvido. O porquê de um caso estar ou não dentro dos parâmetros do Sistema desenvolvido será explicado nos tópicos a seguirem.

4.2. Primeiro Caso

4.2.1. Descrição do Primeiro Caso a Ser Estudado

O primeiro caso a ser estudado neste trabalho foi cedido por Renan Stefanutti, Diretor Geral do EESC-USP Fórmula SAE no ano de 2015. Segundo Stefanutti, “o Formula é uma equipe de 90 alunos dos 10 cursos de Engenharia da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, que visa produzir um engenheiro de excelência para o mercado de trabalho através da construção de um protótipo de alta performance. É da competência dos alunos todo o projeto, construção e testes do carro a ser desenvolvido”.

Dentro desse contexto, a Equipe do Formula, preocupada com a gestão da qualidade, desenvolveu análises FMEA’s a fim de analisar problemas históricos da equipe. Posteriormente, essas análises contribuíram para a atualização de um processo de rotina denominado “Check-List”, o qual fazem uso para realizar uma inspeção prévia no protótipo a ser testado. Stefanutti relatou que “a eficácia desse trabalho foi colocada à prova na final da 12^a Competição Petrobras Formula SAE Brasil, que ocorreu entre os dias 01 e 04 de outubro de 2015, onde a EESC-USP Formula SAE sagrou-se campeã nacional, findando um jejum de 10 anos”. Stefanutti relatou ainda que “O protótipo se apresentou estável durante toda a competição, comprovando a eficácia do método adotado”.

Assim, o caso a ser estudado neste presente trabalho, foi obtido de uma análise FMEA já realizada, sem entrar no mérito de como e em quais circunstâncias tais dados foram obtidos. Este trabalho tem o objetivo de implementar o Sistema de Inferência *Fuzzy* FMEA e, posteriormente, avaliar os resultados e compará-los com o FMEA tradicional, no caso realizado pela Equipe da EESC-USP Formula. A única alteração realizada nas tabelas de análise FMEA cedidas foi correlação aos valores dos parâmetros. Na análise feita pela Equipe da EESC – USP Formula, os valores de entrada (Severidade, Ocorrência e Detecção) assumiam os valores 1, 3 ou 5, e não como o Sistema de Inferência *Fuzzy* FMEA desenvolvido no tópico 3 (entre 1 e 10). Sendo assim, os valores das análises cedidas foram multiplicados por 2 para se adequarem ao Sistema de Inferência desenvolvido. Os efeitos e se esta alteração fez com que a análise FMEA realmente se enquadrasse ao Sistema serão discutidos posteriormente.

4.2.2. Análise FMEA da EESC – USP Formula

A análise FMEA executada pelo Formula está representada na tabela 9:

Componente	Função	Modo de Falha	Categoria	Causa	Efeito	Severidade	Ocorrência	Controle	Detecção	NPR	
						Competição (2-6-10)	(2-6-10)			Competição	
Comando de Válvulas	Controle de abertura e fechamento das válvulas	Falta de Sincronismo	Instalação / Manutenção	Posicionamento do comando	Motor não liga	10	2	Abertura da tampa do cabeçote	6	120	
				Ausência de pastilha					6	120	
		Perda de pressão		Posicionamento incorreto dos cames							
				Integridade da corrente do comando							
				Tensão da corrente do comando	Motor não liga	10	2				
				Falta de guia do comando							
				Posicionamento incorreto dos cames							
				Integridade dos componentes							
Cilindro	Promover combustão	Combustão irregular	Instalação / Manutenção	Pistão avariado	Motor não liga/ Motor Desliga	10	2	Tirar o caboçote - Análise do Pistão, vela e bobina /Pressão no cabeçote/Teste de Vela na ECU (funcionamento da vela e bobina)	6	120	
				Anéis avariados							
				Bobina com mal funcionamento							
				Vela avariada							
				Camisa Avariada							
				Juntas avariadas							
Virabrequim	Conversão de Movimento linear em rotativa	Transmissão irregular de torque/ Vibrações exageradas do motor	Manutenção	Virabrequim avariado	Carro não anda	10	2	Abrir motor inteiro	10	200	
Motor de partida	Dar partida no motor	RPM insuficiente para partida	Manutenção	Avaria no motor de partida/ Algo travando o motor por dentro do mecanismo	Motor não dá partida	10	2	Verificar RPM no Log/Testar motor de partida na bateria/Abrir lateral do mecanismo de partida	2	40	
		Falta de corrente no motor de partida	Manutenção	Chicote avariado/Problema nos enrolamentos do M.Partida	Motor não dá partida	6	6	Verificar chicote/ Testar motor de partida na bateria	6	216	
Bomba de Óleo	Bombeiar Óleo	Falta de bombeamento	Manutenção	Engrenagens avariadas	Motor pára	10	2	Abrir tampa lateral	6	120	
Bomba de Água	Bombeiar Água	Falta de bombeamento	Manutenção	Engrenagens avariadas	Fumaça			Abrir tampa lateral	6	120	
Câmbio	Transmitir Torque	Engrenagens quebradas	Manutenção	Engrenagens avariadas	Carro não anda	10	2	Abrir tampa lateral	6	120	
Radiador	Resfriar motor	Temperatura de trabalho acima do permitido	Manutenção / Instalação	Furo no radiador	Fumaça	6	6	Observar sistema todo e nível de água	2	72	
				Furo nas mangueiras (linha)	Água no chão						
		Projeto		Erro no dimensionamento	Temperatura instável/alta						
				Falta de água							
Bico Injetor	Injetar combustível	Mistura irregular	Manutenção / Instalação	Bico avariado	Motor instável/Não liga	6	2	Teste no bico na ECU	6	72	
Filler-Neck	Levar combustível até tanque	Vazamento de combustível	Instalação / Manutenção	Avariado	Combustível na pista	2	2	Visualizar	2	8	
Tanque de Expansão	Expansão da agua na linha	Vazamento de água	Instalação / Manutenção	Avariado	Água na pista	2	2	Visualizar	2	8	
Respiro de Óleo	Alívio de pressão do circuito de lubrificação	Vazamento de óleo	Instalação	Furo no respiro	Vaza óleo na pista	6	6	Visualizar	2	72	
			Manutenção	Excesso de óleo							
			Projeto	Mal dimensionamento							
Galeria	Levar combustivel para bico	Perda de pressão/ Vazamento de combustivel	Manutenção / Instalação	Furo na galeria/Vazamento nos sensores e espiões	Motor instável/Não liga	6	2	Visualizar	2	24	

Tabela 9 - FMEA do Motor (EESC – USP Formula)

4.2.3. Estudo Comparativo entre FMEA Tradicional e Fuzzy FMEA

A tabela 10 ilustra os valores de Risco (NPR) obtidos a partir do FMEA tradicional e os valores de Risco obtidos a partir do Sistema de Inferência *Fuzzy* FMEA (NPR *Fuzzy*) elaborado no software “fuzzyTECH”:

Componente	Modo de Falha	Severidade	Ocorrência (2-6-10)	Detecção (2-6-10)	Competição			
		Competição (2-6-10)			NPR	Priorização FMEA	NPR <i>Fuzzy</i>	Priorização <i>Fuzzy</i> FMEA
Virabrequim	Transmissão irregular de torque/ Vibrações exageradas do motor	10	2	10	200	2	648.58	1
Comando de Válvulas	Falta de Sincronismo	10	2	6	120	3	574.56	2
	Perda de pressão	10	2	6	120	3	574.56	2
Cilindro	Combustão irregular	10	2	6	120	3	574.56	2
Bomba de Óleo	Falta de bombeamento	10	2	6	120	3	574.56	2
Bomba de Água	Falta de bombeamento	10	2	6	120	3	574.56	2
Câmbio	Engrenagens quebradas	10	2	6	120	3	574.56	2
Motor de Partida	Falta de corrente no motor de partida	6	6	6	216	1	542.84	3
Radiador	Temperatura de trabalho acima do permitido	6	6	2	72	4	417.10	4
Bico Injetor	Mistura irregular	6	2	6	72	4	417.10	4
Respiro de Óleo	Vazamento de óleo	6	6	2	72	4	417.10	4
Motor de Partida	RPM insuficiente para partida	10	2	2	40	5	309.48	5
Galeria	Perda de pressão/ Vazamento de combustível	6	2	2	24	6	259.40	6
Filler-Neck	Vazamento de combustível	2	2	2	8	7	185.52	7
Tanque de Expansão	Vazamento de água	2	2	2	8	7	185.52	7

Tabela 10 – Comparativo entre FMEA Tradicional e Fuzzy-FMEA (Caso 1)

A tabela 10 foi ordenada com relação a prioridade *Fuzzy FMEA* para facilitar a comparação desta com a prioridade do FMEA tradicional.

Inicialmente, observa-se que o modo de falha “Transmissão irregular de torque/Vibrações exageradas do motor” do componente “Virabrequim” que assumia prioridade 2 no FMEA tradicional, passa a assumir prioridade 1 no *Fuzzy FMEA*. Consequentemente, o modo de falha “Falta de corrente no motor de partida” que antes recebia prioridade 1 no FMEA tradicional, passa a ser apenas o terceiro em prioridade na escala do *fuzzy FMEA*. Isto demonstra uma falha na priorização de risco do FMEA tradicional, perante ao real desejo dos especialistas. Portanto, uma simples análise FMEA tradicional pode levar os interessados em ações preventivas ou corretivas à priorizarem modos de falhas com menor risco implícito, contrariando o desejo que é de prevenir ou corrigir aqueles modos de falha que oferecem o maior risco real.

Neste caso é possível analisar ainda a presença de vários empates no FMEA tradicional, que se repetem na análise do Sistema de Inferência *Fuzzy FMEA*. Tal fato é justificado pela multiplicação dos mesmos fatores, no caso do FMEA tradicional, e no Sistema de Inferência *Fuzzy FMEA* desenvolvido, possuir funções de pertinência idênticas para os três parâmetros de entrada, o que faz com que a ordem dos fatores não altere o resultado em ambos os casos. Por exemplo, para ($S=6; O=2; D=6$) e ($S=6; O=6; D=2$) há empate nas duas análises. Porém, para a análise FMEA isso sempre irá ocorrer, pois a mesma não permite a ponderação de seus parâmetros, diferentemente do *Fuzzy FMEA* que permite ponderar os seus parâmetros, através de suas funções de pertinência e/ou da base de regras, quando os interessados julgarem necessário.

Além dos fatos evidenciados anteriormente, este caso ainda permite fazer uma reflexão. Na análise FMEA tradicional realizada pela Equipe da EESC – USP Formula, os parâmetros de entrada assumiam apenas 3 valores de entrada possíveis (1, 3 ou 5, que posteriormente foram transformados em 2, 6 e 10, respectivamente, conforme explicado em 4.2.1), o que fez com que a gama de resultados possíveis fosse reduzida consideravelmente se comparado a uma análise que utiliza valores de 1 a 10 para os três parâmetros de entrada. Assim, não há empate de NPR's oriundos da multiplicação de diferentes fatores. Logo, em um caso simples como o apresentado, a análise FMEA tradicional traz um resultado relativamente satisfatório, pois um dos principais problemas do FMEA tradicional é o empate no Número de Prioridade de Risco para

modos de falha com diferentes valores de Severidade, Ocorrência e Detecção, o que não ocorre neste caso. No segundo caso poderemos evidenciar esse fato.

4.3. Segundo Caso

4.3.1. Descrição do Segundo Caso a Ser Estudado

O segundo caso a ser estudado foi realizado por um grupo de alunos, no qual o autor deste trabalho fez parte, na disciplina Gestão da Qualidade II, disciplina oferecida pelo Departamento de Engenharia de Produção da EESC – USP. O trabalho, que será descrito a seguir, foi realizado no segundo semestre do ano de 2014, sob a supervisão do docente responsável da disciplina naquele ano, Luiz Cesar Ribeiro Carpinetti.

O trabalho consistia na realização de um FMEA para um produto escolhido. O grupo optou por analisar o produto “pneu de veículos leves”. Neste caso, diferentemente do primeiro caso, o grupo optou por usar as escalas tradicionais do FMEA (de 1 a 10 para os três parâmetros). Assim, vale frisar que este caso se encaixa perfeitamente no Sistema de Inferência desenvolvido, pois o mesmo foi baseado em uma análise com os parâmetros de entrada (Severidade, Ocorrência e Detecção) podendo assumir valores entre 1 e 10.

O principal objetivo do trabalho sugerido pelo docente responsável foi ambientar os alunos com um método capaz de verificar quais as não conformidades reais e potenciais para um produto em estudo, bem como as suas respectivas causas e efeitos sobre os clientes, para assim, tornar evidente aqueles modos de falha que merecem maior atenção. Para realizar tal trabalho, o grupo baseou-se em pesquisas quantitativas e qualitativas junto a dados expostos na internet por fornecedores do produto em questão.

4.3.2. Análise FMEA do Grupo de Gestão da Qualidade

A análise FMEA executada pelo grupo está representada na tabela 11:

Modos de Falha	Efeitos dos Modos de Falha	Severidade	Causas Prováveis das Falhas	Ocorrência	Formas de Detecção	Detecção	NPR
Murchar	Insatisfação do Cliente	6	Mau assentamento da roda	2	Exame Visual	3	36
			Bico com defeito	1	Exame Visual/Teste em Água	6	36
			Excesso de peso	3	Exame Visual	2	36
			Vazamento pela Válvula	1	Exame Visual/Teste em Água	6	36
			Vazamento pela base da válvula	1	Exame Visual	6	36
Furar	Atraso	7	Baixa Resistência da Matéria Prima	4	Testes Químicos e Físicos da Qualidade	3	84
			PerfurAÇÃO por objetos pontiagudos	5	Exame Visual/Teste em Água	3	105
Estourar	Acidente	10	Arrastes Laterais	4	Exame Visual	5	200
			Choques Transversais	4	Exame Visual	7	280
			Excesso de Peso	1	Exame Visual	3	30
			Impacto em Obstáculo	4	Exame Visual	8	320
			Reparo em Mau Estado	1	Exame Visual	5	50
			PerfurAÇÃO sem Reparo	1	Exame Visual	6	60
			Aquecimento por Uso Excessivo dos Freios	1	Exame Visual	8	80
			Danos Oriundos da Roda de Alumínio	5	Exame Visual	7	350
			Pressões Anormais	4	Exame Visual	7	280
Não Rodar o Mínimo Estipulado	Insatisfação do Cliente	8	Má Qualidade da Matéria Prima	4	Exame Visual	3	96
Soltura da Banda de Rodagem	Acidente	10	Falha no Projeto do Pneu	7	Gates de Projeto	5	350
			Má Qualidade da Matéria Prima	4	Testes Químicos e Físicos da Qualidade	2	80
			Falha Humana no Processo de Fabricação	4	Testes Químicos e Físicos da Qualidade	3	120
			Falha de Equipamento do Processo de Fabricação	4	Testes Químicos e Físicos da Qualidade	3	120

Tabela 11 – FMEA de Pneu de Veículos Leves

4.3.3. Estudo Comparativo entre FMEA Tradicional e Fuzzy FMEA

Para efeitos de análise, construiu-se a tabela 12 que aliou o estudo realizado pelo grupo de Gestão da Qualidade II com os valores de NPR gerados a partir do Sistema de Inferência Fuzzy FMEA desenvolvido. A tabela 12 é mostrada a seguir:

Modos de Falha	Severidade	Causas Prováveis das Falhas	Ocorrência	Detecção	NPR	Priorização FMEA	NPR Fuzzy	Priorização Fuzzy FMEA
Estourar	10	Danos Oriundos da Roda de Alumínio	5	7	350	1	778,06	1
Soltura da Banda de Rodagem	10	Falha no Projeto do Pneu	7	5	350	1	778,06	1
Estourar	10	Impacto em Obstáculo	4	8	320	2	722,60	2
Estourar	10	Choques Transversais	4	7	280	3	722,54	3
Estourar	10	Pressões Anormais	4	7	280	3	722,54	3
Estourar	10	Arrastes Laterais	4	5	200	4	630,08	4
Soltura da Banda de Rodagem	10	Falha Humana no Processo de Fabricação	4	3	120	5	538,98	5
Soltura da Banda de Rodagem	10	Falha de Equipamento do Processo de	4	3	120	5	538,98	5
Estourar	10	Aquecimento por Uso Excessivo dos Freios	1	8	80	9	500,58	6
Estourar	10	Perfuração sem Reparo	1	6	60	10	500,54	7
Não Rodar o Mínimo Estipulado	8	Má Qualidade da Matéria Prima	4	3	96	7	491,82	8
Furar	7	Perfuração por objetos pontiagudos	5	3	105	6	475,00	9
Estourar	10	Reparo em Mau Estado	1	5	50	11	463,56	10
Soltura da Banda de Rodagem	10	Má Qualidade da Matéria Prima	4	2	80	9	455,14	11
Furar	7	Baixa Resistência da Matéria Prima	4	3	84	8	433,94	12
Murchar	6	Bico com defeito	1	6	36	12	346,56	13
Murchar	6	Vazamento pela Válvula	1	6	36	12	346,56	13
Murchar	6	Vazamento pela base da válvula	1	6	36	12	346,56	13
Estourar	10	Excesso de Peso	1	3	30	13	315,52	14
Murchar	6	Mau assentamento da roda	2	3	36	12	270,72	15
Murchar	6	Excesso de Peso	3	2	36	12	270,72	15

Tabela 12 – Comparativo entre FMEA Tradicional e Fuzzy-FMEA (Caso 2)

Para fins de análise, a tabela está classificada em ordem de priorização do NPR gerado a partir do Sistema de Inferência desenvolvido no software fuzzyTECH.

Para os cinco primeiros modos de falhas, verifica-se uma igualdade entre os sistemas de análise (FMEA tradicional e Sistema de Inferência *Fuzzy FMEA*), o que indicaria uma análise satisfatória do FMEA. No entanto, a partir da classificação de número 5, nota-se uma desigualdade com relação às classificações de cada método, o

que comprova uma inexatidão do FMEA tradicional perante à expectativa dos especialistas.

As diferenças começam a ser notadas nas posições 6 e 7 da classificação do *Fuzzy FMEA*, que antes assumiam a classificação, respectivamente, 9 e 10 no FMEA tradicional. Estas diferenças de classificação evidenciadas por esse estudo de caso demonstram a fragilidade do método utilizado pelo FMEA tradicional, o produto das notas dos parâmetros Severidade, Ocorrência e Detecção. Sendo assim, modos de falha que antes possuíam um NPR melhor classificado na escala de priorização da análise FMEA tradicional, passam a receber uma classificação menor quando analisados no Sistema de Inferência *Fuzzy FMEA*, e vice-versa. A principal causa das diferenças entre os métodos se dá pelos relacionamentos não-lineares entre as variáveis, justificados pela presença de uma base de regras e de funções de pertinência que a lógica *fuzzy* proporciona. Através destas, os especialistas conseguem expressar suas necessidades e obter uma resposta de acordo com aquilo que realmente priorizam.

Neste caso, diferentemente do primeiro caso, conseguimos notar que há empates no NPR do FMEA tradicional oriundos de notas diferentes. Por exemplo, os modos de falha que estão classificados em 12º no FMEA tradicional possuem um NPR de valor 36, mas alguns são resultados de um produto de notas com (S=6; D=1; O=6), (S=6; D=2; O=3) ou (S=6; D=3; O=2). Isto evidencia mais um ponto fraco da análise FMEA tradicional, pois esta análise levaria os interessados em priorizar de forma igual eventos com parâmetros distintos. Pelo mesmo motivo justificado no parágrafo anterior, a análise através de um Sistema de Inferência *Fuzzy FMEA* permite que haja resultados distintos para esses casos (veja na tabela 12 a diferença dos NPR's apresentados para o método *Fuzzy FMEA*).

Este caso ainda permite identificar a ocorrência de empates derivados de valores de entrada iguais, mas em ordem diferente. Por exemplo, os modos de falha que recebem priorização 1 tanto na classificação do FMEA tradicional, quanto no *Fuzzy FMEA*, possuem os seguintes valores de entrada: (S=10; O=5; D=7) e (S=10; O=7; D=5); e em ambas as classificações eles recebem NPR's com valores iguais. Pelo mesmo motivo explicado no Caso 1, isso ocorre no FMEA tradicional porque ele obtém o NPR através de uma simples multiplicação de fatores, ou seja, a ordem dos fatores não irá alterar o produto. Já com relação ao empate também identificado na

classificação *Fuzzy FMEA*, este ocorre devido a forma com que o Sistema de Inferência, aqui proposto, foi desenvolvido, onde os especialistas responsáveis optaram por ponderar as variáveis de entrada de maneira similar, sem diferenciação. Portanto, caso haja necessidade de ponderação diferencial entre as variáveis de entrada em uma análise FMEA, um Sistema de Inferência *Fuzzy* torna-se imprescindível neste caso, pois, diferente do FMEA tradicional, este permite uma ponderação de forma não linear de suas variáveis.

5. Conclusão

Nesta monografia foi abordado os benefícios relacionados ao uso da lógica *fuzzy* aliada à FMEA. Com a crescente competitividade entre empresas, a busca por um atendimento ao cliente de referência torna-se essencial na sobrevivência e crescimento das mesmas. Logo, a procura por ferramentas e/ou métodos que auxiliem na identificação e, consequente, aprimoramento do atendimento de requisitos dos clientes é de suma importância para as empresas no cenário atual.

Esta monografia teve como objetivo desenvolver e implementar um Sistema de Inferência *Fuzzy* FMEA, a fim de comparar e validar as vantagens do uso deste Sistema de Inferência com o FMEA tradicional. Assim, a metodologia *Fuzzy* FMEA se mostrou bastante satisfatória, podendo inclusive comprovar diversos benefícios citados neste trabalho:

- Desenvolvimento de um método organizado que permitiu combinar conhecimento especializado e experiência em um estudo FMEA. A relação entre NPR e os parâmetros Severidade, Ocorrência e Detecção deixou de ser considerada linear, como no modelo convencional de NPR (FMEA tradicional), para ser considerada uma relação não linear;
- O uso de termos linguísticos permitiu aos avaliadores atribuir valores mais significativos aos fatores considerados e, assim, melhorar a eficácia da análise FMEA;
- A flexibilidade de atribuir pesos aos fatores, pode fornecer um meio específico de identificar modos de falha mais críticos e, assim, contribuir para uma priorização mais eficaz;
- As combinações dos fatores de entrada (S, O, D) foram modeladas através da base de regras (Se-Então). Ou seja, uma falha só teve um NPR elevado se esta possuía uma determinada combinação dos fatores S, O e D, que estavam descritas pelas regras Se-Então com consequente elevado. Isto contribui para solucionar situações em que o NPR não refletia o verdadeiro risco da falha.

Portanto, a combinação da lógica *fuzzy* com a análise FMEA pode contribuir com uma designação de recursos para ações de correção mais eficaz, pois um Sistema de Inferência *Fuzzy* FMEA retorna melhores resultados do índice NPR em relação à incerteza do risco. Sendo assim, a metodologia empregada atingiu os objetivos principais desse trabalho: implementou um Sistema de Inferência *Fuzzy* FMEA a partir de uma base de regras desenvolvida por especialistas, avaliou e comparou os resultados com o FMEA tradicional.

Para a realização de trabalhos futuros, sugere-se os seguintes tópicos:

- Aliar outras ferramentas de apoio à decisão à metodologia *Fuzzy* FMEA, como o QFD e/ou a Matriz de Interações);
- Aplicar um Sistema de Inferência *Fuzzy* FMEA para o controle de falhas em uma empresa para, assim, diagnosticar a eficácia das vantagens do uso da lógica *fuzzy*.

6. Referências Bibliográficas

- AGUADO, A. G.; CANTANHEDE, M. A. **Lógica Fuzzy**. Faculdade de Tecnologia, UNICAMP, 2010.
- AGUIAR, D. C.; SOUZA, H. J. C.; SALOMON, V. A. P. **Aplicação do AHP para a Avaliação dos Critérios de Pontuação de FMEA de Processo**. XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2009.
- ARAÚJO, W. P. P. **Metodologia FMEA-Fuzzy Aplicada à Gestão de Indicadores de Continuidade Individuais de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. Florianópolis, 2008.
- BOARIN PINTO, S. H.; CARVALHO, M. M.; LINDA, L. H. **Implementação de programas de qualidade: um survey em empresas de grande porte no Brasil**. Gestão & Produção, v.13, n.2, p. 191-203, 2006.
- CARPINETTI, L. C. R.; MIGUEL, P. A. C.; GEROLAMO, M. C. **Gestão da Qualidade ISO 9001:2008: princípios e requisitos**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2011.
- CHIN, K.; CHAN, A.; YANG, J. **Development of a Fuzzy FMEA Based Product Design System**. 2008.
- CROSBY, P. **A Gestão pela Qualidade**. Banas Qualidade, 1998.
- HEGEDUS, C. E. **Os Gurus da Qualidade**. Escola de Administração Mauá, 2004.
- KUMRU, M.; KUMRU P. Y. **Fuzzy FMEA Application to Improve Purchasing Process in a Public Hospital**. 2013.
- LIMA JÚNIOR, F. R.; CERVI, A. F. C.; CARPINETTI, L. C. R. **Uma Metodologia Multicritério Baseada em Inferência Fuzzy para Classificação ABC de Estoques**. PODes, v.6, n.3, p. 343-366, Rio de Janeiro, Setembro a Dezembro de 2014.
- MAMDANI, E. H. **Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Systems**. IEEE Transactions on Computers, 1977.
- OLIVEIRA, O. J. **Gestão da Qualidade – Tópicos Avançados**. Cengage Learning Editores, 2004.
- SLACK, N. et al. **Administração da produção**. São Paulo: Atlas, 1999.

- STAMATIS, D. H. *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. ASQC Quality Press, 1995.
- TOLEDO, J. C. **Gestão da qualidade na agroindústria**. Editora Atlas, 1997.
- VENTER, G.; HAFTKA, R. T. *Using Response Surface Methodology in Fuzzy Set Based Design Optimization*. 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 1998.
- XU, K.; TANG, L. C.; XIE, M.; HO, S. L.; ZHU, M. L. *Fuzzy Assessment of FMEA for engine systems*. Reliab Eng Syst Safety, 2002.
- ZADEH, L. 'Fuzzy Sets'. Inf Control, 1965.