

# PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS EM FMEA CONSIDERANDO O CUSTO DE OCORRÊNCIA DO MODO DE FALHA

**Eduardo de Azevedo Degen (UNISINOS)**

eduardodegen@gmail.com

**Miriam Borchardt (UNISINOS)**

miriamb@unisinis.br

**Giancarlo Medeiros Pereira (UNISINOS)**

gian@unisinis.br

**Miguel Afonso Sellitto (UNISINOS)**

sellitto@unisinis.br



*Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um método para avaliação de riscos através do FMEA que considera o custo potencial da ocorrência da falha. A proposta de avaliação de riscos incorporando aspectos econômicos foi desenvolvida para um FMEA de processo. A mesma foi testada em um produto sinterizado aplicado em motores da cadeia automotiva. Primeiramente, buscou-se analisar e entender a dinâmica do método FMEA nos moldes atuais bem como compreender a importância da utilização de aspectos econômicos para a análise e priorização de riscos. O método proposto muda a forma tradicional de se avaliarem as prioridades. O método tradicional, SOD, para gerar as prioridades de ação, sugere a ordenação do índice de “Severidade”, em ordem decrescente, seguido do índice de “Ocorrência” e, depois do índice de “Detecção”. O método proposto considera a ordenação decrescente da “Severidade”, seguida da ordenação decrescente da “Ocorrência” vezes “Custos” e da ordenação decrescente da “Detecção”. Desta forma, os valores obtidos, pelo método tradicional e pelo método proposto, não são comparáveis. O que passa a ser relevante é a indicação das prioridades. Observou-se que as prioridades obtidas pelo método proposto são significativamente diferentes das obtidas pelo FMEA tradicional.*

*Palavras-chaves: FMEA, FMEA de Processo, análise de risco*

## 1. Introdução

Nos dias atuais, vive-se em um cenário globalizado e altamente competitivo. Para se manter dentro dos níveis exigidos pelo mercado, uma gestão consistente é essencial. A mesma deve proporcionar medidas que possibilitem a melhoria contínua na tomada de decisões, prevenindo eventos indesejáveis, minimizando perdas e maximizando oportunidades. Deste modo, as organizações podem buscar cada vez mais fortalecer sua capacidade competitiva, evitando problemas que coloquem em risco sua imagem ou tudo aquilo que possa repercutir negativamente. Nesse sentido, os processos e seus riscos devem ser conhecidos e gerenciados; os sistemas da qualidade servem para dar suporte a essas necessidades. De acordo com a necessidade e características das corporações, o processo de gerenciamento dos riscos utiliza-se de diferentes ferramentas que facilitam a gestão. Pode-se citar como exemplos a árvore de decisão, a matriz de riscos, a análise do valor agregado, a análise de Monte Carlo e, dentre esses exemplos se destaca o método FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) (COLIN, 2007).

Muitas empresas, em diversos países, utilizam o FMEA como uma alternativa para alcançar seus objetivos dentro do universo corporativo. O FMEA tem um foco preventivo e busca identificar e priorizar falhas potenciais por análise qualitativa que se vale de pontuações atribuídas por um grupo multifuncional aos fatores de Severidade, Ocorrência e Detecção. Deste modo, torna-se possível estabelecer um *ranking* de prioridade dos riscos atribuídos ao produto ou aos processos em estudo (KMENTA e ISHII, 2000).

Diversos autores têm discutido o FMEA, apresentando ganhos e vantagens decorrentes da aplicação do mesmo, adaptações em função do uso pretendido ou de limitações identificadas no método. Puente et al. (2002) apresentam um método alternativo de aplicação do FMEA suportado um sistema de tomada de decisão baseado em critérios qualitativos. Sankar e Prabhu (2001) propõem uma adaptação na escala de avaliação do índice de risco utilizada tradicionalmente no FMEA. Propostas de aplicação de FMEA integrado em uma cadeia de suprimentos são apresentadas em Sinha et al. (2004) e em Teng et al. (2006). Fernandes e Rebelato (2006) usam o FMEA em conjunto com o QFD (Desdobramento da Função Qualidade). Shahin (2004) discute a integração do FMEA com o modelo de Kano. Uma proposta de adaptar o FMEA para aplicações em serviços pode ser vista em Rotondaro (2002). Devadasan et al. (2003) sustentam a idéia de que métodos como o FMEA devam estar inseridos no contexto de um sistema de gestão da qualidade para serem implementados.

Braglia (2000) e Ahsen (2008) trazem à tona a necessidade de serem considerados os custos econômicos decorrentes de uma falha. Para Ahsen (2008), a avaliação das falhas com o FMEA é insuficiente, porque os resultados não refletem os custos que surgem a partir da mesma; o autor ainda relata que informações de custo são fundamentais para tomar decisões com intuito de melhorar as atividades. Kmenta e Ishii (2000) destacam que a pontuação atribuída à probabilidade de ocorrência de uma falha reflete a probabilidade da causa e do modo de falha imediato e não a probabilidade dos efeitos finais. Xu et al. (2002) acrescentaram à FMEA técnicas para lidar com incertezas e imprecisões nas informações consideradas.

Considerando a necessidade de se incluir uma avaliação econômica quando da obtenção das prioridades a corrigir a partir do uso do FMEA, este artigo investigou: *Como incorporar o custo potencial da ocorrência de uma falha à avaliação de riscos do FMEA?* A resposta pode fornecer subsídios para a proposição de um método para avaliação de riscos através do FMEA

que considere o custo potencial da ocorrência da falha. A proposta de avaliação de riscos considerando aspectos econômicos foi desenvolvida para um FMEA de processo. A mesma foi testada em um produto sinterizado aplicado em motores da cadeia automotiva.

Apresenta-se, na seqüência, o referencial teórico. Posteriormente apresenta-se o método proposto para avaliação de risco em FMEA considerando-se o custo potencial da falha. Por fim, discutem-se os resultados e apresentam-se as conclusões.

## 2. Referencial teórico

O FMEA surgiu em 1949 e destinava-se às análises de falhas em sistemas e equipamentos da Indústria Militar Americana. O mesmo emergiu nos anos 60 na NASA com a primeira aplicação formal através do *Apollo Space Program* (SEGISMUNDO e MIGUEL, 2008). Desde então, o método tem sido adotado e padronizado por organizações de classe mundial. Desde 1976, o FMEA vem sendo utilizado no ramo automobilístico e atualmente constitui-se numa ferramenta importante para as empresas desse segmento (BASTOS, 2006).

O FMEA tem como objetivo identificar e ranquear falhas potenciais de projeto ou processo. A equipe de FMEA identifica, avalia e prioriza as falhas potenciais. O método auxilia a focar recursos nos modos de falha de maior risco (SINHA et al., 2004; KMENTA e ISHII, 2000). O mesmo deve ser desenvolvido por uma equipe multifuncional (ou multidisciplinar). A dimensão da equipe dependerá tanto da complexidade do projeto, quanto do tamanho e organização da empresa. Os membros da equipe precisam de conhecimentos especializados relevantes, tempo disponível e autoridade ratificada pelo gerenciamento (AIAG, 2008; AGUIAR e SALOMON, 2006). Para Puente et al. (2002), o FMEA permite que problemas potenciais sejam analisados e que possíveis defeitos em produtos sejam identificados antes de chegarem ao cliente final. Deste modo, os efeitos no sistema completo podem ser estudados e decisões mais assertivas de controle podem ser tomadas, tanto para o FMEA de projeto (DFMEA) quanto para o FMEA de processo (PMEA).

Além dos aspectos expostos, para Braglia (2000), são também vantagens do FMEA: (i) a visibilidade das informações que constam em um FMEA torna-o facilmente entendido por todos participantes do grupo multidisciplinar de FMEA; (ii) o FMEA, se visto como um procedimento sistemático, gera uma base de dados facilmente gerenciada com auxílio de software e que sustenta a manutenção do histórico do desenvolvimento do produto ou do processo; (iii) o FMEA auxilia na identificação das fraquezas do processo de desenvolvimento de produtos e de processos possibilitando ajustes nos procedimentos; (iv) a atenção e priorização das ações fica claramente estabelecida e focada em poucos componentes ou processos; (v) a partir das informações do FMEA, podem ser estabelecidos procedimentos, controles e registros necessários no desenvolvimento de produtos e no processo produtivo; recomenda-se que estes sejam integrados ao sistema de gestão da qualidade.

O autor menciona dificuldades e problemas corriqueiros na implementação do FMEA. Entre estes, as equipes de FMEA devem ser bem treinadas e coordenadas para que usem critérios homogêneos para atribuição das pontuações usadas em um FMEA. Nem sempre estas pontuações são geradas a partir de dados relacionados ao desempenho de um produto ou processo; muitas vezes, são feitas por julgamento com base na experiência da equipe. Xu et al. (2002) mencionam duas limitações que devem ser observadas na aplicação do FMEA: (i) nem sempre os cálculos de probabilidades são suficientemente precisos, pois o método vale-se de categorizações, não de variáveis de campo; e (ii) nem sempre os elementos em julgamento são mutuamente exclusivos: pode haver influência mútua ou correlação entre fatores em julgamento, o que deve ser considerado pelo grupo.

Outro ponto levantado refere-se à dificuldade de manutenção de um FMEA. Cada vez que ocorrerem alterações no projeto do produto ou no processo, o FMEA deveria ser revisado e deveriam ser avaliadas possíveis alterações nos riscos identificados e nas prioridades de ações. Também deveria ser verificado se há a necessidade de alterações em procedimentos, controles e registros estabelecidos a partir do FMEA (BRAGLIA, 2000). Como este trabalho foi desenvolvido e testado em um FMEA de processo, o mesmo é detalhado na seqüência. Detalhes a respeito de FMEA de projeto podem ser obtidos em Puente et al. (2002).

## 2.1 FMEA de processo

Na indústria automotiva, a maioria das companhias divide o FMEA em FMEA de projeto (DFMEA) e FMEA de processo (PFMEA). O DFMEA é um método para identificar, por exemplo, se os materiais certos estão sendo usados, em conformidade com as especificações do cliente, e assegurar que regulamentações governamentais estão sendo seguidas, antes do projeto do produto ser finalizado. Engenheiros de produto/projeto são normalmente os líderes do time de DFMEA. Por outro lado, o PFMEA lida com a manufatura/processo de fabricação. Tradicionalmente, o PFMEA nasce quando o DFMEA já foi concluído. O PFMEA identifica qualquer falha potencial que poderia ser causada pelo processo de fabricação, máquinas, instalações, e métodos de produção. O Engenheiro de Processo normalmente é o líder do time do PFMEA (TENG e HO, 1996).

Para Garcia (2000), a utilização de FMEA de Processo elimina os pontos fracos do processo, reduzindo o risco de falhas a valores aceitáveis. Quando utilizado com eficiência, o PFMEA, além de ser um método útil na análise do processo, permite a melhoria contínua e serve de registro histórico para futuros estudos. A utilização do PFMEA visa identificar as características de processo que são críticas para os diversos tipos de falhas, através de questionamentos referentes à consequência da falha, probabilidade de ocorrência e probabilidade de detecção antes de afetar o cliente (AGUIAR e MELLO, 2008). Assim, pela relação existente entre a severidade do modo de falha, a frequência na qual a falha pode ocorrer e a probabilidade de detecção da falha, o PFMEA tem como meta auxiliar na análise e definição de soluções de engenharia de processo em resposta a fatores, tais como qualidade, confiabilidade, manutenibilidade, custos e produtividade.

## 2.2 Avaliação de riscos

Os riscos em projetos podem ser definidos como eventos indesejáveis que podem causar atrasos, gastos excessivos, resultados insatisfatórios para o projeto, organização, sociedade, meio ambiente e até, fracasso total do mesmo (SHENHAR, 2001). De acordo com o PMBOK (PMI, 2000), um risco de projeto é um evento ou condição incerta que, se ocorrer, terá um efeito positivo ou negativo sobre pelo menos um objetivo do projeto, como prazo, custo, escopo ou qualidade. A maioria das definições de riscos contém dois elementos básicos: (i) chance: possibilidade, incerteza, probabilidade, etc. e (ii) consequências: custo, dano, perigo, etc. (KMENTA e ISHII, 2000).

Apesar das definições de risco de projeto serem claras e concisas, e a determinação de possíveis riscos técnicos em sistemas bem conhecidos (PATÉ-CORNELL, 2002, apud SEGISMUNDO e MIGUEL, 2008), o gerenciamento dos riscos ao longo do ciclo de vida de um projeto ainda não se mostra maduro. Em seu estudo, Shenhar (2001) concluiu que o gerenciamento de riscos está ainda em sua infância e que, em função disso, maiores esforços são necessários quanto à aplicação, treinamento, desenvolvimento de ferramentas e pesquisas quanto ao assunto.

O FMEA é uma das técnicas mais utilizadas em análise de risco de projeto para identificar possíveis modos de falha e prever seus efeitos e relevância (SEGISMUNDO e MIGUEL 2008). O propósito do FMEA é priorizar falhas potenciais de acordo com os riscos. Como uma ferramenta para avaliação de riscos, o FMEA é útil para identificar a gravidade dos potenciais efeitos de falha e para fornecer uma entrada para as medidas minimizadoras destinadas a reduzir o risco.

Os riscos são avaliados no FMEA tradicional de três maneiras: (i) severidade, (ii) ocorrência e (iii) detecção. Severidade é a avaliação do nível de impacto de uma falha, no cliente. Ocorrência é a frequência de incidência da causa de uma falha. Detecção é uma avaliação de quão bem os controles de produto ou de processo detectam a causa de uma falha ou do modo de falha.

Estes três índices são avaliados a partir de uma escala que vai de 1 a 10, e para todos eles, quanto menor a pontuação, menor é o risco. Quanto menor a severidade, menor será o impacto no cliente de uma possível falha (exemplo: severidade igual a 1, é considerado como nenhum efeito perceptível e severidade igual a 10, envolve falha em atender os requisitos de segurança e/ou regulatórios). Quanto menor a pontuação de ocorrência, menor é a probabilidade de uma determinada causa de uma falha ocorrer (exemplo: ocorrência igual a 1 é considerada como probabilidade muito baixa de ocorrência da falha ou a falha é eliminada por controle preventivo; ocorrência igual a 10 é quando a probabilidade de falha é muito alta). Para se atingir uma classificação mais baixa de detecção, geralmente o controle de detecção planejado tem de ser aprimorado (exemplo: detecção igual a 1 indica que a probabilidade de detecção é praticamente certa através da prevenção do erro; detecção igual a 10 ocorre quando não há oportunidade de detecção e, portanto, a probabilidade de detecção é praticamente impossível) (AIAG, 2008).

### 2.3. Limitações do FMEA tradicional

Johnson e Khan (2003) mencionam limitações do PFMEA. As mesmas são decorrentes da dificuldade de se compreender claramente o que é causa e o que é efeito. As relações entre causalidade nem sempre são lineares. O autor reforça, também, que a análise do custo da falha não é levada em consideração no momento de se determinar as prioridades das ações.

Outros autores, como por exemplo, Chang e Sun (2009), Ahsen (2008) e Tay e Lim (2006), Sankar e Prabhu (2000), Franceschini e Galetto (2001), relatam algumas limitações observadas na utilização da escala de priorização de riscos obtida pelo RPN (*Risk Priority Number*). No FMEA tradicional, o RPN é determinado pelo produto dos três fatores de entrada, Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D). Obtém-se, então,  $RPN = S \times O \times D$ . O resultado gerado é expresso por um valor entre 1 e 1000.

Os autores citados acima também sugerem melhorias nessa forma de avaliação e priorização de riscos. O manual de referência do FMEA, AIAG (2008), usado no setor automotivo, sugere que o RPN não seja mais usado como o método primário para avaliação de risco. O manual também não recomenda o uso de um valor de referência para RPN acima do qual, necessariamente, a empresa deva executar uma ação de melhoria. O manual ainda sugere avaliações de risco alternativas, como por exemplo a alternativa SOD que é a combinação não aritmética das classificações de Severidade, Ocorrência e Detecção. O SOD, quando classificado em ordem numérica decrescente, priorizará os cenários. Em primeiro lugar é considerada a Severidade; em segundo, a Ocorrência e, finalmente, em terceiro, a Detecção. Dessa forma o presente trabalho considera essa última limitação citada por alguns autores já superada, e usará como base a alternativa SOD para desenvolvimento da nova proposta de

## FMEA.

Um exemplo é apresentado na Tabela 1. São ilustradas três situações distintas em que o RPN das mesmas é igual. Esse RPN foi obtido pela multiplicação da Severidade pela Ocorrência e pela Detecção. Tal situação ocorre porque os fatores da multiplicação, nos três casos, são os mesmos; apenas a ordem dos mesmos é alterada na multiplicação. Utilizando-se o SOD para determinação do índice de risco, ordena-se em ordem decrescente a Severidade (neste caso, 7, 7 e 3). Na seqüência, para os itens com mesma Severidade (7 no caso deste exemplo), também em ordem decrescente, vem a Ocorrência (entre os itens que têm Severidade 7, segue-se em primeiro lugar o item com Ocorrência 7 e depois o item com Ocorrência 3). Por fim, ordena-se a Detecção, também em forma decrescente. O valor numérico SOD corresponde ao índice atribuído para a Severidade, seguido do índice atribuído para a Ocorrência e por fim do índice designado para a Detecção. Nota-se que em cada um dos casos o valor do SOD é diferente embora todos os três casos tenham o mesmo RPN.

S	O	D	RPN	SOD
7	7	3	147	773
7	3	7	147	737
3	7	7	147	377

Tabela 1 – Avaliação alternativa de risco - SOD

O FMEA nas fases de desenvolvimento de novos produtos, além de prever possíveis falhas dos mesmos, auxilia a gerenciar, de uma forma mais ampla, os riscos associados a falhas potenciais. No entanto, aspectos gerenciais ligados ao desenvolvimento de produtos e de processos como possíveis atrasos, desvios de escopo e do orçamento não são observados através do uso do FMEA (SEGISMUNDO e MIGUEL, 2008). O FMEA, por si só, não constitui um método de gerenciamento de riscos; deve-se integrar a este dimensões de análise dos impactos nos prazos, escopo, custos, ainda com uma tratativa temporal da evolução dos riscos (MIGUEL e SEGISMUNDO, 2008).

De uma perspectiva econômica, o método FMEA não é apropriado especialmente porque o custo da falha não é considerado (BRAGLIA, 2000). A avaliação das falhas com o FMEA é insuficiente, porque os resultados não refletem os custos que surgem a partir da mesma. Já, com a finalidade de tomar decisões para melhorar as atividades, informações de custo são indispensáveis (AHSEN, 2008).

A classificação de ocorrência reflete a probabilidade da causa e do modo de falha imediato e não a probabilidade dos efeitos finais (AIAG, 2008; KMENTA e ISHII, 2000). Considere duas possíveis situações associadas ao fogo em uma cozinha: (i) o fogo na gordura causou somente danos na cozinha, e (ii) o fogo na gordura fez o prédio pegar fogo. Apesar da diferença, a classificação de ocorrência para estes dois cenários seria idêntica; intuitivamente, sabe-se que somente causar danos na cozinha é mais provável do que o prédio pegar fogo.

Segundo a definição de risco, há mais interesse na probabilidade da causa que na dos efeitos resultantes. Os dois cenários relatados no exemplo associado ao fogo em uma cozinha têm diferentes probabilidades (e saídas) e, portanto apresentam diferentes riscos. As diferentes probabilidades não seriam refletidas usando o índice de ocorrência (KMENTA e ISHII,

2000).

### 3. Metodologia de pesquisa

A questão de pesquisa foi *Como incorporar o custo potencial da ocorrência de uma falha à avaliação de riscos do FMEA?* O objetivo foi, portanto, desenvolver um método de análise e priorização de riscos, integrando aspectos técnicos e econômicos. Primeiramente, buscou-se analisar e entender a dinâmica do método FMEA nos moldes atuais, também o entendimento da importância da utilização de aspectos econômicos para a análise e priorização de riscos fez-se necessário. Com base nesses estudos iniciais, foram analisadas alternativas para que o custo da falha fosse considerado na priorização das mesmas.

Questões de pesquisa do tipo **como** remetem, segundo Yin (2001), ao método do estudo de caso. Tais estudos podem ser exploratórios, se levantarem fatos e hipóteses para futuros estudos; descritivos, se buscarem associações entre as variáveis identificadas nos estudos exploratórios; ou explanatórios, se apresentarem explicações para estas associações (YIN, 2001; PRODANOV, 2001). Casos replicados poderão eventualmente conduzir a uma teoria fundamentada (EISENHARDT, 1989). Segundo Eckstein (1975, *apud* ROESCH, 1999, p.87), um estudo de caso pode contribuir de cinco modos para uma eventual teoria. O primeiro gera uma descrição profunda e específica de um objeto. O segundo interpreta eventuais regularidades como evidências de postulados teóricos ainda não verificados. O terceiro é heurístico: uma situação é construída para testar uma idéia. O quarto faz sondagens plausíveis acerca de uma teoria proposta pelo modo heurístico e o quinto modo, o caso crucial, apóia ou refuta a teoria. Nos três últimos modos, os objetivos são, em graduação, gerar, explorar e testar teorias. Como é a primeira abordagem, entende-se que seja um caso exploratório. Também entende-se que a contribuição seja do terceiro tipo: uma situação heurísticamente construída para o teste e robustecimento de uma idéia.

O método proposto para o cálculo do índice de risco do FMEA foi testado em uma empresa multinacional do setor automotivo, fabricante de duas famílias de produtos sinterizados aplicados em motores a combustão, sendo eles, os Anéis Assento de Válvula e as Guias de Válvula. A empresa estudada, atualmente em seu segmento, é a de maior representatividade no mercado automobilístico nacional. Através do estudo de caso realizado foi possível testar o método proposto para analisar os riscos de processo avaliados através do método FMEA, considerando o custo potencial da ocorrência da falha.

O método de trabalho foi: (i) análise das alternativas de cálculo do índice de risco usando o FMEA; (ii) escolha da opção viável considerando viabilidade técnica e requisitos contratuais usuais da indústria automotiva; (iii) obtenção de informações sobre o custo da ocorrência da falha, no processo produtivo, para o produto em estudo; (iv) obtenção do PFMEA elaborado na empresa, para o produto em estudo; (v) desenvolvimento do método de cálculo de risco considerando o custo potencial da falha; (vi) comparação dos índices de risco obtido no PFMEA desenvolvido pela empresa e calculado com o método proposto; e (vii) discussão e análise dos resultados.

Observa-se, porém, que este estudo não tem como objetivo se sobrepor ao fator de severidade que continua sendo considerado como o de maior prioridade. Sendo assim, tomou como base a alternativa SOD (combinação não aritmética das classificações de Severidade, Ocorrência e Detecção (ex: Severidade=7, Ocorrência=3, Detecção=5, o SOD resultante é 735) para priorização de riscos, os mesmos são classificados em ordem numérica descendente, priorizando os cenários, em primeiro por severidade, em segundo por ocorrência e finalmente por detecção.

#### 4. Desenvolvimento do trabalho

A idéia central na aplicação de custos na pontuação do risco através do FMEA é gerar uma análise de riscos mais completa e coerente. Para tanto foi realizado um teste de um PFMEA com a nova proposta de pontuação, ou seja, com a integração de custos à pontuação já existente, quantificando o custo da ocorrência da falha. A escolha do produto analisado, o Anel Assento de Válvula da família dos materiais "COMO", fornecido para uma montadora de automóveis, foi baseada na sua representatividade no faturamento da empresa; o mesmo representa 9,55% do total faturado pela empresa no ano de 2009.

Outros aspectos considerados na elaboração da nova proposta foram a simplicidade e a facilidade no entendimento e aplicação da mesma para que, posteriormente, as equipes de FMEA possam fazer uso deste método sem necessidade de suporte especializado.

##### 4.1. Integrando FMEA e custos

Propôs-se utilizar como critério base para priorização dos riscos o método SOD (combinação não aritmética de Severidade, Ocorrência e Detecção). Conforme os critérios desta avaliação deve se priorizar, por critério descendente, a seqüência Severidade, Ocorrência e Detecção (SOD). Decidiu-se que a Severidade, por representar a criticidade do modo de falha e especialmente o impacto do risco no cliente, não seria alterada, permanecendo como principal indicador de risco. Já no critério de ocorrência observaram-se inconsistências quando comparado com diversos índices de ocorrência de modos de falha distintos, ou seja, valores mais altos de ocorrência atribuídos a modos de falha em etapas iniciais do processo quando comparados a modos de falha de etapas posteriores. Desta forma, despertou-se o interesse por uma análise mais profunda do índice de ocorrência. Quanto ao critério de Detecção reservou-se ao direito de apenas sugerir melhorias para um próximo trabalho.

Desta forma, o método a ser proposto sugere a alteração de três fatores formadores da pontuação de riscos para quatro fatores. O que era S (Severidade), O (Ocorrência) e D (Detecção) passou para S (Severidade), O X C (Ocorrência x Custo) e D (Detecção). Neste caso, a prioridade dos riscos que era mensurada através da proposta SOD, passou para S (OxC) D. Segue-se, ainda, a mesma regra da proposta SOD, ou seja, priorizar em primeiro lugar o índice de Severidade, na seqüência o produto Ocorrência x Custo e por último o índice de Detecção.

Os custos foram abordados de forma cumulativa, ou seja, a cada etapa do processo concluída, foi agregado valor ao produto e, portando, quanto mais perto do final do processo o produto estiver, os modos de falha terão um maior risco econômico incorporado. Também optou-se por trabalhar com os custos em porcentagem relativa ao custo total e não com o custo direto da falha (exemplo: na etapa 50 do processo uma peça sucateada custa 65,995 % do custo total do produto). Essa opção de trabalhar com o custo em porcentagem e não em valor monetário, diminui os esforços para levantamento dos mesmos quando for necessária a avaliação em vários itens. Considera-se que trabalhando com os custos em porcentagem, podem ser formadas famílias de produtos, ou seja, pode ser realizado o levantamento dos custos por família, sem a necessidade de avaliação individual, o que simplifica o trabalho.

##### 4.2 Critério de Ocorrência

Observa-se que a determinação do índice de ocorrência do FMEA atual leva em consideração apenas a probabilidade de uma determinada causa ocorrer. Essa é uma das fragilidades observadas: a causa de um modo de falha é de difícil mensuração e controle, portanto de difícil gerenciamento. Por outro lado, as conseqüências ou efeitos finais da causa para uma



avaliação de risco parecem ser mais apropriados, além de serem mais facilmente mensurados e controlados. Porém, mesmo considerando a consequência da causa, observaram-se dificuldades para comparar ocorrências de modos de falha de diferentes etapas do processo por não representarem o real impacto. Por exemplo, uma falha ocorrida na etapa número 10 não pode ser comparada com uma falha da etapa 120 apenas pelo índice de ocorrência, ou seja, apenas sobre o aspecto quantitativo.

Para que essa comparação seja possível e, principalmente, demonstre o valor agregado em cada etapa do processo, fez-se necessário a inclusão de uma mensuração comum a todas as etapas. Sendo assim, incorporou-se à avaliação os custos do Anel Assento de Válvula que foram mensurados para cada etapa do processo conforme Tabela 2.

<b>Análise do custo do Anel Assento de Válvula</b>	
<b>Etapas do Processo</b>	<b>Custo Acumulado (%)</b>
10	0,217
20	49,582
30	50,472
40	60,355
50	65,995
60	67,159
70	68,459
80	74,621
90	75,896
100	82,418
110	84,440
120	88,731
130	90,752
140	92,629
150	94,506
160	97,922
170	97,922
180	99,784
190	100,000

Tabela 2 – Análise do custo do Anel Assento de Válvula

O intuito, neste caso, foi de analisar a influência especificamente do custo da Ocorrência na análise de riscos. Observa-se que a Severidade é o primeiro índice a ser considerado na elaboração do *ranking* de prioridade; entretanto, o mesmo não é objeto de análise desse estudo e, portanto, não foi modificado. Foram então, analisados 13 modos de falha com o mesmo valor de Severidade (neste caso, Severidade 8), de várias etapas do processo do item estudado, conforme tabela 3. Nesta tabela, é apresentada a seqüência de priorização obtida.

A partir das informações mostradas nas tabelas 2 e 3 e baseando-se nos custos fragmentados por etapa de processo de fabricação do produto estudado, calculou-se o custo da probabilidade de ocorrência para os modos de falha com Severidade igual a 8. Com o objetivo de analisar a influência do custo no segundo critério de priorização (Ocorrência), incluiu-se então o custo, realizando o produto entre o mesmo e o índice de Ocorrência, formando o custo da probabilidade de Ocorrência de cada modo de falha, conforme Tabela 4.

Etapa do Processo	Modo de Falha	Sequência	S	O	D	SOD
		FMEA tradicional				
30	Trincas Longitudinais	1	8	3	6	836
70	Trincas	2	8	3	6	836
120	Geometria fora da especificação	3	8	3	5	835
30	Porosidade / Falha de material	4	8	2	9	829
70	Peças sem chanfro externo	5	8	2	8	828
120	Peças com corte oblíquo	6	8	2	8	828
150	Peças sem usinagem do diâmetro externo	7	8	2	8	828
180	Não detecção de peças com perfil externo (chanfros, gorja) abaixo da especificação ou ausência do mesmo	8	8	2	7	827
10	Erro de identificação (etiquetas trocadas) ocorrido entre diferentes materiais de um mesmo fornecedor	9	8	2	7	827
10	Matéria-Prima não-conforme por tempos prolongados de estocagem	10	8	2	5	825
20	Presença de impurezas na mistura	11	8	2	5	825
150	Variação no diâmetro externo	12	8	2	5	825
20	Desmistura das formulações de mistura	13	8	1	10	8110

Tabela 3 – Priorização dos índices de risco obtidos pelo FMEA atual

Etapa do Processo	Modo de Falha	Sequência	S	O	C (%/100)	OxC	D	S (OxC) D
		nova proposta						
120	Geometria fora da especificação.	1	8	3	0,887	2,661	5	8-2,66-5
70	Trincas.	2	8	3	0,684	2,053	6	8-2,05-6
180	Não detecção de peças com perfil externo (chanfros, gorja) abaixo da	3	8	2	0,997	1,995	7	8-1,99-7

	especificação ou ausência do mesmo.								
150	Peças sem usinagem do diâmetro externo	4	8	2	0,945	1,890	8	8-1,89-8	
150	Variação no diâmetro externo.	5	8	2	0,945	1,890	5	8-1,89-5	
120	Peças com corte oblíquo.	6	8	2	0,887	1,774	8	8-1,77-8	
30	Trincas Longitudinais.	7	8	3	0,504	1,514	6	8-1,51-6	
70	Peças sem chanfro externo.	8	8	2	0,684	1,369	8	8-1,37-8	
30	Porosidade / Falha de material.	9	8	2	0,504	1,009	9	8-1,01-9	
20	Presença de impurezas na mistura.	10	8	2	0,495	0,991	5	8-0,99-5	
20	Desmistura das formulações de mistura.	11	8	1	0,495	0,495	10	8-0,49-10	
10	Erro de identificação (etiquetas trocadas) ocorrido entre diferentes materiais de um mesmo fornecedor.	12	8	2	0,021	0,042	7	8-0,04-7	
0	Matéria-Prima não - conforme por tempos prolongados de estocagem.	13	8	2	0,021	0,042	5	8-0,04-5	

Tabela 4 - Priorização dos índices de risco obtidos pelo FMEA modificado

Pode-se observar na tabela 4 que a partir da inclusão do custo da probabilidade de ocorrência, formou-se um novo critério de avaliação dos riscos. Desta forma, se obteve uma nova seqüência de priorização para tomada de ação. A tabela 5 indica as alterações na priorização obtida usando o método proposto

<b>Modo de Falha</b>	<b>Seqüência FMEA tradicional</b>	<b>Seqüência método proposto</b>
Trincas Longitudinais	1	7
Trincas	2	2
Geometria fora da especificação	3	1
Porosidade / Falha de material	4	9
Peças sem chanfro externo	5	8
Peças com corte obliquo	6	6
Peças sem usinagem do diâmetro externo	7	4
Não detecção de peças com perfil externo (chanfros, gorja) abaixo da especificação ou ausência do mesmo	8	3
Erro de identificação (etiquetas trocadas) ocorrido entre diferentes materiais de um mesmo fornecedor	9	12
Matéria-Prima não - conforme por tempos prolongados de estocagem	10	13
Presença de impurezas na mistura	11	10
Varição no diâmetro externo	12	5
Desmistura das formulações de mistura	13	11

Tabela 5 – Comparativo entre as priorizações obtidas com FMEA tradicional e método proposto.

Observa-se que o modo de falha “Geometria fora de especificação” passou a ser considerado a primeira prioridade; pelo FMEA tradicional este modo de falha seria o 3º. em prioridade. O modo de falha “Trinca” permaneceu como segunda prioridade, tanto usando o método proposto como através do FMEA tradicional. “Não detecção de peças com perfil externo (chanfros, gorja) abaixo da especificação ou ausência do mesmo”, que estava em 8ª. colocação assume a 3ª. posição no método proposto. “Peças sem usinagem do diâmetro externo” muda de 7ª. posição para quarta posição. “Variação no diâmetro extern” assume a 5ª. posição pelo método proposto; pelo método tradicional, este modo de falha encontra-se na 12ª. posição.

O método proposto muda a forma tradicional de se avaliarem prioridades. O método tradicional, SOD, para gerar as prioridades de ação, sugere a ordenação do índice de “Severidade”, em ordem decrescente, seguido do índice de “Ocorrência” e, depois do índice de “Detecção”. O método proposto considera a ordenação decrescente da “Severidade”, seguida da ordenação decrescente da “Ocorrência” vezes “Custos” e da ordenação decrescente da “Detecção”.

Desta forma, os valores obtidos, pelo método tradicional e pelo método proposto, não são comparáveis. O que passa a ser relevante é a indicação das prioridades. Como o Manual AIAG (2008) não recomenda mais uma pontuação limite para a priorização dos modos de falhas, o método proposto não apresenta dificuldades neste sentido.

Destaca-se, também, que a equipe de FMEA da empresa em estudo considerou o método proposto de fácil aplicação, uma vez que a estrutura de custo dos produtos é conhecida e estabelecida. Os resultados surpreenderam visto que as mudanças de prioridade foram representativas. Por outro lado, as mesmas são compatíveis com o desempenho observado nas diversas operações do processo estudado.

## 5. Conclusão

Este trabalho teve por objetivo desenvolver um método de avaliação de riscos em FMEA que considere o custo potencial de uma falha. Procurou-se manter a atual praticidade do FMEA, trazendo uma nova proposta de avaliação que complemente a atual. Sendo assim a adesão a nova proposta não requer o desenvolvimento de novas habilidades ou competências, mas sim o entendimento dos benefícios e aplicação.

O método proposto foi testado através do PFMEA de um “Anel Assento de Válvula”. As alterações nas prioridades obtidas foram significativas, porém, segundo a equipe de FMEA da empresa estudada, compatíveis com demais desempenhos observados no processo.

Como continuidade deste trabalho, sugere-se que a avaliação dos modos de falhas e seus efeitos através do FMEA considere também os custos de detecção. Este tipo de análise auxiliaria na tomada de decisão sobre investimentos em melhoria dos processos e em melhoria da detecção.

Outro aspecto a ser avaliado diz respeito à aceitação do método proposto pelas montadoras do setor automotivo uma vez que, em muitos casos, a aplicação de ferramentas, métodos e técnicas relacionadas à melhoria da qualidade é prescritiva e pré-estabelecida com critérios rígidos.

## Referências

- AGUIAR, C.; MELLO, P.** FMEA de processo: uma proposta de aplicação baseada nos conceitos da ISO 9001: 2000. *XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. Rio de Janeiro, 2008.
- AGUIAR, C.; SALOMON, P.** Levantamento de erros na aplicação de FMEA de processo em empresas dos níveis mais inferiores da cadeia de fornecimento da indústria automotiva. *XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. Fortaleza, 2006.
- AHSEN, V.** Cost-oriented failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*; v. 25, n.5, p. 466 – 476, 2008.
- AIAG - Automotive Industry Action Group.** *Análise de Modo e Efeito de Falha Potencial (FMEA)*. Manual de Referência, 4ª edição, 2008.
- BASTOS, A.** FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) como ferramenta de prevenção da qualidade em produtos e processos – uma avaliação da aplicação em um processo produtivo de usinagem de engrenagem. *XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. Fortaleza, 2006.
- BRAGLIA, M.** MAFMA: multi-attribute failure mode analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*; v. 17, n. 9, p. 1017 – 1033, 2000.
- CHANG, S.; SUN, P.** Applying DEA to enhance assessment capability of FMEA. *International Journal of Quality & Reliability Management*; v. 26, n.6, p. 629 – 643, 2009.
- COLIN, E.** Pesquisa Operacional. S. Paulo: LTC, 2007.
- DEVADASAN, R.; MUTHU, R.; SANKARAN, R.** Design of total failure mode and effects analysis programme. *International Journal of Quality & Reliability Management*; v. 20, n. 5, p. 551 – 568, 2003.
- EISENHARDT, K.** Building theories from case study research. *Academy of Management Review*, v.14, n.4, p.532-550, 1989.

- FERNANDES, J.; REBELATO, M.** Proposta de um método para integração entre QFD e FMEA. *Gestão & Produção*; v. 13, n. 2, p. 245-259, 2006.
- FRANCESCHINI F.; GALETTO, M.** A new approach for risk priorities of failure modes in FMEA. *International Journal of Production Research*; v.39, n.13, p. 2991 - 3002, 2001.
- GARCIA, M.** 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.
- Johnson, K.; Khan, M.** A study into the use of the process failure mode and effects analysis (PFMEA) in the automotive industry in the UK. *Journal of Materials Processing Technology*; v. 139, n. 1-3, p. 348 – 356, 2000.
- KMENTA S.; ISHII K.** Scenario-based FMEA: A life cycle cost perspective. *Proceeding of DETC / ASME - Design Engineering Technical Conferences*, 2000, Baltimore, Maryland.
- MIGUEL P.; SEGISMUNDO, A.** O papel do FMEA no processo de tomada de decisão em desenvolvimento de novos produtos: Estudo em uma Empresa Automotiva. *Produto & Produção*; v.9, n.2, p.106-119, 2008.
- PMI – Project Management Institute - Tradução livre do PMBOK (Project Management Body of Knowledge) , V 1.0, disponibilizada através da Internet pelo PMI MG em maio de 2000 – acesso em abril/2010.**
- PRODANOV, C.** *Manual da Metodologia Científica*. Novo Hamburgo: Feevale, 2001.
- PUENTE, J.; RAÚL, P.; PRIORE, P.; FUENTE, D.** A decision support system for applying failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v.19, n. .2, p. 137 – 150, 2002.
- ROESCH, S.** *Projetos de estágio e de pesquisa em administração: guia para estágios, trabalhos de conclusão, dissertações e estudos de caso*. São Paulo: Atlas, 1999.
- ROTONDARO, R.** SFMEA: Análise do Efeito e Modo da Falha em Serviços – aplicando técnicas de prevenção na melhoria de serviços. *Revista Produção*; v. 12, n. 2, p. 54 – 62, 2002.
- SANKAR, N. PRABHU, B.** Modified approach for prioritization of failures in a system failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*; v. 18, n.3, p. 324 – 336, 2001.
- SHENHAR, A.** One Size does not Fit All Projects: Exploring Classical Contingency Domains. *Management Science*; v. 47, n. 3, p. 394-414, 2001.
- SEGISMUNDO, A.; MIGUEL, P.** Failure mode and effects analysis (FMEA) in the context of risk management in new product development. *International Journal of Quality & Reliability Management*; v. 25, n. 9, p. 899 – 912, 2008.
- SHAHIN, A.** Integration of FMEA and the Kano model an exploratory examination. *International Journal of Quality & Reliability Management*; v. 21, n. 7, p. 731 – 746, 2004.
- SINHA, P.; WHITMAN, L.; MALZAHN, D.** Methodology to mitigate supplier risk in an aerospace supply chain. *Supply Chain Management: An International Journal*; v. 9, n. 2, p. 154 – 168, 2004.
- TAY, K. M.; LIM, C. P.** Fuzzy FMEA with a guided rules reduction system for prioritization of failures. *International Journal of Quality & Reliability Management*; v.23, n.8, p. 1047 – 1066, 2006.
- TENG, S.; HO, S.; SHUMAR, D.; LIU, P.** Implementing FMEA in a collaborative supply chain environment. *International Journal of Quality & Reliability Management*; v. 23, n. 2, p. 179 – 196, 2006.
- TENG, S.; HO, S.** Failure mode and effects analysis – An integrated approach for product design and process control. *International Journal of Quality & Reliability Management*; v. 13, n.5, p.8-26, 1996.
- XU, K.; TANG, L.; XIE, M.; HO, H.; ZHU, M.** Fuzzy assessment for engine systems. *Reliability Engineering and Systems Safety*; v.75, n.1, p.17-29, 2002.
- YIN, R.** *Estudo de caso: planejamento e método*. P. Alegre: Bookman, 2001.