

PROPOSTA DE ANÁLISE INTEGRADA DE FALHAS POTENCIAIS DE PRODUTO

Rafael Laurenti (EESC-USP) laurentirafael@yahoo.com.br
Henrique Rozenfeld (EESC-USP) roz@sc.usp.br

RESUMO

As empresas enfrentam o desafio de prever o maior número de falhas potenciais de *design* (projeto) durante as fases iniciais do desenvolvimento de um novo produto. Por meio de uma revisão bibliográfica e de um estudo de casos múltiplos, foi evidenciado que os problemas e dificuldades que as empresas enfrentam para realizar essa previsão de falhas referem-se à análise de mudanças de engenharia, ao momento de aplicação do FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) no ciclo processo de desenvolvimento de produtos (PDP), à integração/iteratividade do FMEA com o PDP e com outros métodos, à reutilização de conhecimentos sobre falhas, ao trabalho multidisciplinar, à atribuição de responsabilidades e ao comprometimento dos colaboradores. Esse artigo apresenta uma proposta de análise integrada de falhas potenciais de produto que pode auxiliar as empresas a superar esses desafios. A proposta é baseada nos métodos FMEA, DRBFM (*Design Review Based on Failure Mode*) e FTA (*Fault Tree Analysis*). Apesar de a proposta ter sido desenvolvida com base em melhores práticas, futuros trabalhos devem ser conduzidos para a sua avaliação e validação.

Palavras-chave: Análise de falhas potenciais de produto, FMEA, DRBFM.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, novos produtos vêm sendo lançado no mercado em ciclos cada vez mais curtos [1]. A maioria dos novos produtos em engenharia é projetada através de modificações de produtos existentes, ou seja, o desenvolvimento de produtos envolve a contínua evolução de um projeto (*design*) inicial [2, 3]. Essa evolução envolve modificações para não só atender necessidades existentes, desejos emergentes ou expectativas latentes dos consumidores [4], como também para melhorar o desempenho dos produtos ou corrigir defeitos [5].

No entanto, mudanças de engenharia podem introduzir novas falhas potenciais no produto [6-8]. As falhas afetam a confiabilidade e disponibilidade do produto e causam prejuízos tanto para o fabricante quanto para o usuário. Na indústria automobilística isto é particularmente verdadeiro. Vários estudos mostram que, além de prejuízos financeiros, revelações de defeitos nos produtos, como nos recalls, por exemplo, afetam negativamente a reputação das montadoras perante o mercado [9, 10] com consequente perdas no valor da marca e das ações [10, 11] e queda nas vendas [10, 12]. De maneira análoga, as mesmas evidências relacionadas à perda de lucros [13] já haviam sido apresentadas para recalls fora do setor automobilístico.

Além do mais, produtos defeituosos levam a maiores impactos ambientais, pois mesmo que eles tenham sido projetados para durar, terão de ser reparados ou substituídos [14].

Neste cenário, a habilidade de colocar rapidamente no mercado produtos que desempenhem adequadamente suas funções com um número mínimo de falhas distingue as melhores empresas das demais [15]. Os rápidos avanços tecnológicos, a diminuição do ciclo de vida dos produtos e o aumento de suas funcionalidades tornam cada vez mais complexa a tarefa de desenvolver produtos com alta qualidade e confiabilidade.

A avaliação da qualidade e confiabilidade de um produto é tradicionalmente feita nos estágios avançados de seu desenvolvimento, por meio de inúmeros testes, técnicas estatísticas e modelagem matemática [16]. Contudo, as empresas se defrontam como o desafio de prever a maior quantidade de falhas potenciais de produto nos estágios iniciais de seu desenvolvimento.

A abordagem proativa de previsão de problemas pode proporcionar a diminuição da quantidade alterações no projeto (*redesigns*) [17] e de testes e protótipos (de avaliação e validação) necessários para o desenvolvimento de um produto [18]. Além disso, benefícios financeiros também podem ser

alcançados, já que o custo para realizar uma modificação aumenta exponencialmente com o decorrer das fases do processo de desenvolvimento de produtos (PDP) [19, 20].

Existem vários métodos que podem ser utilizados para antecipar falhas de produto. O mais utilizado na indústria é o método FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis* – Análise dos Modos e Efeitos de Falhas) [21-23]. O FMEA auxilia os projetistas a entenderem e descobrirem os modos, os efeitos e as causas de falhas potenciais, avaliarem o risco de cada modo de falha e a identificarem as ações corretivas para evitar a ocorrência das falhas.

No entanto, diversos problemas e dificuldades referentes à previsão de falhas potenciais de produto têm sido reportados. Em uma revisão de literatura realizada pelos autores deste artigo, foram encontrados problemas referentes (1) à análise de mudanças de engenharia, (2) ao momento de aplicação do FMEA no ciclo do PDP, (3) à integração/iteratividade do FMEA com o PDP e com outros métodos e (4) à reutilização de conhecimentos sobre falhas. Além da revisão de literatura, foi realizado um estudo de casos múltiplos que levantou dificuldades enfrentadas por empresas na condução de análises de falhas quando um produto é modificado.

Neste artigo é apresentada uma proposta de análise integrada de falhas potenciais de produto com o objetivo de auxiliar as empresas a superar os problemas/dificuldades citados acima. A proposta contempla os métodos FMEA, DRBFM (*Design Review Based on Failure Mode* – Revisão de Projeto Baseada em Modos de Falhas) e o método FTA (*Fault Tree Analysis* – Análise da Árvore de Falhas). O método DRBFM foi desenvolvido por engenheiros da *Toyota Motor Corporation* para analisar modos de falhas potenciais introduzidos por mudanças no projeto (*design*), e o método FTA auxilia as análises do FMEA e do DRBFM na visualização da relação causa-efeito de falhas, da propagação de falhas entre diferentes sistemas do produto e de problemas em suas interfaces.

O restante do artigo é organizado como se segue: na seção 2 é exposta a metodologia de pesquisa adotada; na seção 3 é descrito o processo de aplicação do FMEA, alguns de seus problemas e dificuldades, e o processo de aplicação do DRBFM; na seção 4 são descritos os resultados do estudo de casos múltiplos; na seção 5 é apresentada a proposta de análise integrada de falhas; e finalmente, a seção 6 conclui o artigo com considerações finais sobre a proposta e apontando trabalhos futuros.

2 METODOLOGIA DE PESQUISA

Foi realizada uma revisão de literatura que levantou alguns dos problemas e dificuldades da prevenção de falhas potenciais. Posteriormente, foi conduzido um estudo de casos múltiplos em quatro empresas diferentes, utilizando, a mesma unidade de análise. Para Yin [24] em estudos de casos múltiplos as evidências resultantes são consideradas mais convincentes, e o estudo global é visto como algo mais robusto. Foi definido como unidade de análise “os desafios enfrentados para se prever falhas quando um produto é modificado”. A técnica utilizada para a coleta de dados foi entrevista focada, em que o respondente é entrevistado por um curto período de tempo, usualmente respondendo um grupo de questões [24]. A primeira quarta parte de todas as entrevistas foi informacional para se compreender o cenário de cada empresa. Questões específicas foram feitas sobre como as análises de falhas são conduzidas, seus objetivos, se são formais ou informais, quais colaboradores são envolvidos e se lições aprendidas são registradas e futuramente reusadas. Questões contextuais investigaram quais são os benefícios e dificuldades das análises, os recursos necessários para sua realização. Os resultados do estudo de caso estão detalhados na seção 4.

Após a revisão de literatura inicial e o estudo de casos múltiplos, foi desenvolvida a proposta de análise integrada de falhas potenciais apresentada nesse artigo. Trabalhos futuros serão conduzidos para validar a proposta.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção será apresentado o processo de aplicação do FMEA, alguns dos problemas e dificuldades de sua aplicação, e o processo de aplicação do DRBFM.

3.1 Processo de aplicação do FMEA

A Análise dos Modos e Efeitos de Falhas é um método utilizado para identificar, priorizar e mitigar problemas potenciais de um dado produto. Um pequeno, porém representativo, grupo formado por membros do time de projeto e de outras disciplinas familiares com o ciclo de vida do produto executa a análise em uma ou mais sessões. O FMEA se inicia com a identificação de funções ou requisitos de um sistema, subsistema ou componente, de como eles podem falhar, dos efeitos e causas de cada falha.

Utilizando uma escala de 0 a 10, o grupo multidisciplinar atribui valores à (S) severidade dos efeitos e as (O) probabilidades de ocorrência das causas. Posteriormente, são listados os controles atuais de projeto de prevenção e detecção que asseguram a adequação do projeto para o modo de falha e/ou causa considerados, e são atribuídos valores (também numa escala de 0 a 10) para (D) dificuldade de detecção. É então feito o produto dos valores da S, O e D, obtendo-se o Índice de Prioridade de Risco (*Risk Priority Number* - RPN). Em seguida o grupo propõe ações para eliminar ou detectar os modos de falhas, suas causas, ou ainda para limitar seus efeitos, e prioriza as ações que possuem os valores mais altos de RPN. Finalmente, são definidos responsáveis pelas implementações das ações recomendadas, bem como os respectivos prazos para execução.

Na figura 1 é ilustrada a visão estrutural das informações do FMEA.

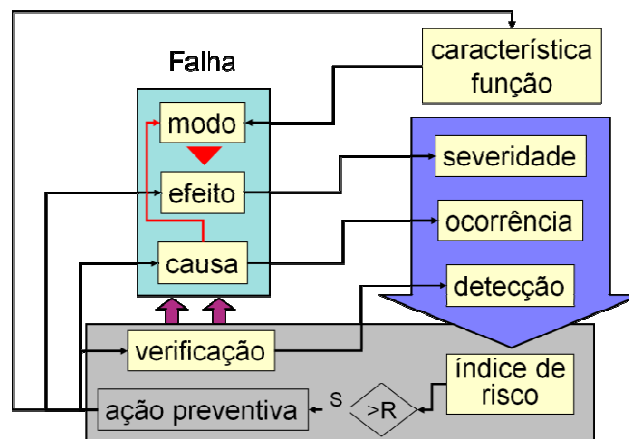


Figura 1 – Visão estrutural das informações do FMEA

Fonte: [19] p.366

Se um FMEA é conduzido corretamente, os documentos resultantes contêm conhecimentos sobre o design do produto. Portanto, eles são valiosas fontes de *know-how* para a empresa.

Os principais outputs da análise são [25]: registros dos modos de falhas encontrados nos diferentes estágios do projeto do produto; evidências de ações requisitadas e tomadas; registro do sucesso ou falha da ação; evidência de redução de risco; e medição relativa de redução do risco para cada modo de falha.

3.2 Problemas e dificuldades

O conhecido método da qualidade, desde sua concepção em meados da década de 60 na indústria aeroespacial americana, tem sido mundialmente usado para diagnosticar falhas potenciais. O FMEA foi difundido através da indústria automobilística durante a década de 80. Atualmente, o método é considerado uma melhor prática e é aplicado em vários setores, tais como telecomunicações, medicina, eletrônica, construção civil, equipamentos militares, etc.

No entanto, para muitas empresas a tarefa de prever falhas potenciais ainda é um desafio. Nos parágrafos seguintes serão apresentados os problemas e dificuldades que foram encontrados na revisão de literatura. Os problemas/dificuldades foram classificados em quatro grupos: (1) análise de modificações, (2) momento aplicação do FMEA no ciclo do PDP, (3) integração/iteratividade do FMEA com o PDP e com outros métodos e (4) reutilização de conhecimentos sobre falhas.

1. Análise de modificações: como descrito na seção de introdução, grande parte dos produtos lançados no mercado são variações de produtos existentes. No entanto, o uso do FMEA tradicional não permite um detalhamento apropriado para avaliar os efeitos das novas falhas potenciais introduzidas pelas modificações no projeto (*design*) do produto [8]. Portanto os resultados de mudanças no produto são com frequência inadequadamente analisados, gerando problemas de confiabilidade.
2. Momento da aplicação do FMEA no ciclo do PDP: usualmente as empresas utilizam o FMEA muito tarde no ciclo de desenvolvimento de um novo produto, tendo pequena influência na melhora global do projeto do produto[26]. Uma pesquisa [17] do tipo *survey*, realizada em 1990 na indústria automotiva do Reino Unido, identificou, dentre outros, um problema semelhante. A análise de FMEA é usualmente feita com o propósito de checagem e não para prevenção de

problemas, o que leva ao aumento do número de *redesigns*. Esta *survey* também identificou que a maioria dos fornecedores só aplicava o FMEA por que ela uma obrigação contratual com as montadoras.

3. Integração/iteratividade com o PDP e com outros métodos: apesar de existirem várias outras melhores práticas que podem apoiar e complementar a FMEA na execução da análise de falhas potenciais [22], o FMEA é tratado como uma técnica isolada, ou seja, não é integrada com o processo de desenvolvimento, e conseqüentemente nem com outros métodos de gestão da qualidade [27]. Isso resulta em um trabalho adicional para criar novamente essas informações na aplicação do FMEA, já que as informações do FMEA (tanto entradas como saídas) também estão presentes em outros documentos gerados no PDP.
4. Reutilização de conhecimentos sobre falhas: comumente, em análises de sistemas similares, dados de falhas não são considerados/recuperados [26]. “(...) Nem mesmo falhas anteriores de componentes mecânicos com *part number* idênticos são apresentadas como possíveis modos de falha (...)”, exemplifica o autor [26]. A FMEA quando rigorosamente aplicada pode auxiliar na detecção de riscos em um produto. Mas, para aplicá-la detalhadamente deve estar disponível uma quantidade significativa de informações sobre os componentes do produto [28].

Esses e outros problemas levam os praticantes da FMEA a considerarem-na uma tarefa laboriosa, que consome muito tempo [23, 29, 30]. A aplicação “tradicional” da FMEA pode aumentar a carga de trabalho dos engenheiros em até 20%, e apesar do esforço os resultados são pobres [27]. Outra constante reclamação é que a análise é subjetiva, baseada na experiência dos praticantes [31].

3.3 Processo de aplicação do DRBFM

O DRBFM é um método específico para analisar os efeitos de pequenas mudanças, que podem introduzem novas falhas potenciais no produto. O método deve ser aplicado de maneira integrada com a FMEA e é indicado para projetos do tipo incremental ou variante e em modificações de projetos plataforma [8].

É usado para se identificar problemas e desenvolver medidas preventivas notando e discutindo modificações intencionais (*design modifications*) e modificações incidentais (*changes in part environment*). O método encoraja a habilidade do ser humano em achar problemas, e é uma ferramenta prática baseada na FMEA e na FTA (*Fault Tree Analysis*) [32].

O processo de aplicação do DRBFM é dividido em duas fases: a fase de análise das mudanças e a fase Revisão de Projeto [33].

Na primeira fase é executada, , uma análise inicial das mudanças propostas pelo engenheiro de projeto responsável. Adicionalmente, é documentado o nome item, as modificações de projeto/ambiente que estão sendo propostas e as funções do item. Então os modos de falha potencial (perda da função ou valor para o cliente) devidos a mudança, as causas potenciais dos modos de falha e os efeitos (impactos) potenciais para o cliente são identificados e é determinada a importância do efeito do modo de falha potencial para o próximo componente, subsistema, sistema ou cliente.

Na fase seguinte o engenheiro de projeto revisa junto com um time multifuncional o formulário do DRBFM previamente preenchido por ele. Primeiramente, o engenheiro de projeto explica em detalhes a modificação proposta no produto. O time multifuncional revisa, analisa e discute detalhadamente o que foi feito na primeira fase, e, em seguida, desenvolve ações para prevenir que as falhas encontradas ocorram. Nesta fase são seguidos os seguintes passos, por meio de discussão rigorosa: identificar e documentar quaisquer outros modos de falha ou preocupações não consideradas pelo engenheiro de projeto; determinar quaisquer outros efeitos criados pelos novos modos de falha; determinar quaisquer causas potenciais adicionais dos novos modos de falha e preocupações, ou causas adicionais para os modos de falha e preocupações identificados pelo engenheiro de projeto; recomendar ações para eliminar/mitigar as causas ou os modos de falha. Essas ações podem ser endereçadas ao Projeto, à Avaliação/Validação/Análise/Teste e à Manufatura/Fornecedor; determinar responsáveis e prazos de implementação para cada ação recomendada; e exportar dados para o formulário do correspondente FMEA.

Conforme as ações são executadas, seus resultados e status são documentados.

As ferramentas que devem ser utilizadas para auxiliar a aplicação do DRBFM são [32, 34, 35]:

- Diagramas de blocos funcionais: ilustra as relações físicas e funcionais dos sistemas, subsistemas e componentes (SSCs) e suas interfaces;
- Lista de pontos modificados (*Changed Point List*): essa lista auxilia a definir e esclarecer o que se

pretende modificar ou foi modificado nos SSCs. Exemplos de pontos modificados podem ser mudanças estruturais, no material, no tratamento térmico, na tensão/carregamento, no processo de fabricação, etc.

- Matriz relacional entre funções e pontos modificados (*Functions x Changed Points Matrix*): essa matriz indica se existe interação entre as funções dos SSCs e os pontos modificados. Se não existir interação, nenhum modo de falha potencial necessita ser considerado. Dessa maneira, os modos de falhas são esclarecidos, pois é identificada qual função é afetada por qual modificação.
- Desenhos e protótipos anteriores (quando disponível): ajuda na visualização dos SSCs;
- Histórico de falhas na fase de uso: previne que aconteçam problemas recorrentes; e
- O formulário de trabalho de DRBFM: os resultados da discussão (análise) e as providências encontradas são documentados detalhadamente nesse formulário.

Essas ferramentas são úteis para auxiliar na identificação das mudanças intencionais e também das mudanças resultantes delas (mudanças incidentais). Além disso, as ferramentas devem ajudar na visualização das estruturas e funções dos SSCs durante a sessão do DRBFM.

4 ESTUDO DE CASOS MÚLTIPLOS

Quando o mesmo estudo contiver mais de um caso único, ele é chamado de estudo de casos múltiplos [24]. Os resultados do estudo de casos múltiplos e as respectivas descrições das empresas participantes serão apresentados nas subseções desta seção.

4.1 Empresa A

A empresa A é uma empresa de médio porte que fabrica máquinas e equipamentos para conformação plástica com dois segmentos: (1) máquinas para corte e solda – máquinas automáticas para fabricação de sacolas plásticas grandes e pequenas, sacolas “camiseta”, sacolas de fundo redondo e de rótulos pré-formados ou não; (2) máquinas para termoformagem e para conformação a vácuo – máquinas para *one-way packaging*, i.e., potes, tampas e bandejas.

Quando uma família de máquinas é requisitada para ser modificada, o grupo de projeto de engenharia primeiramente cria um modelo virtual e realiza testes virtuais. Então, uma análise de falhas complementar é feita baseada nos conhecimentos dos membros do grupo; reconhecendo-se, assim, a importância de colaboradores competentes. A análise é realizada para verificar a conformidade do novo projeto e para prevenir que falhas ocorram no campo.

No entanto, a maior restrição da empresa é o tempo para testar a nova máquina antes de enviá-la ao cliente. Por essa razão, às vezes, após alguns meses, quando eles já venderam algumas máquinas do novo modelo, um erro de projeto costuma aparecer e então são obrigados a realizar um recall. Foi dito pelo entrevistado que essa é uma situação melhor do que não enviar a máquina ao cliente no prazo acordado.

Lições aprendidas são registradas em um relatório de validação para futuro compartilhamento, mas isto não tem se mostrado eficiente. Assim, a maioria das lições aprendidas é compartilhada verbalmente.

4.2 Empresa B

O segundo caso foi conduzido em uma empresa de médio porte fabricante de equipamentos ópticos. Nesta empresa o processo de mudanças de engenharia é sistematicamente estruturado e controlado. Todas as análises de mudanças de projeto são coordenadas por um time de melhoria. Inicialmente, eles documentam quem solicitou a modificação, o tipo de modificação (na estrutura, no material, no tratamento térmico, etc.), o motivo (redução de custo, atualização, melhoria de tecnologia, etc.), os documentos do produto (desenhos, procedimentos, listas, etc.) que talvez sejam necessários modificar, e o colaborador responsável da mudança. Então, o time julga o risco da mudança. Se existirem riscos, o processo de mudança é iniciado; caso não existam riscos, as mudanças propostas podem ser implementadas sem a necessidade de executar nenhuma análise de falhas.

Para avaliar potenciais falhas introduzidas pelas mudanças, o time de melhoria atribui autoridade a um time multidisciplinar (especialistas mecânicos e elétricos). Na avaliação, o time multifuncional aplica os métodos FMEA e FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*), que são complementados com análises de CAD (*Computer Aided Design*), CAE (*Computer Aided Engineering*) e de FEM (*Finite Element Method*), seguidos de vários testes com protótipos funcionais

e de discussões entre os membros do time multidisciplinar. Após os testes, o novo projeto (*design*) é aprovado ou reprovado pelo gerente responsável pelo projeto.

Foi respondido que não ocorrem *recalls* devido às mudanças, mas sim devido, principalmente, a atualizações e melhorias tecnológicas. Além disso, antes da implementação do processo de mudanças de engenharia, as solicitações de mudanças eram constantes e elas diminuíram após a implementação do processo. Foi adicionado que no início foi difícil para os colaboradores se conscientizarem que o trabalho em grupo era necessário.

4.3 Empresa C

O terceiro caso foi conduzido em uma empresa de médio porte que desenvolve equipamentos de automação para vários setores industriais, tais como, etanol, papel e celulose, químico, metalúrgico e agrícola.

A empresa possui um processo de mudanças de engenharia formal e estruturado, que pode ser iniciado por solicitações de clientes ou por sugestões de melhoria vindas de colaboradores internos ou da assistência técnica. Depois do pedido de mudança ter sido feito, o gerente do departamento de pesquisa e desenvolvimento conduz uma análise crítica para identificar os impactos (na empresa) da mudança, os riscos envolvidos, recursos e tempo necessários, e o nível de dificuldade para a implementação. Então, se a modificação for aprovada, é desenvolvido um plano que descreve o pessoal necessário, o cronograma de alteração e os testes necessários.

Os testes são executados por um time de especialistas de software e hardware em diferentes módulos. O time pode consultar um banco de dados de problemas anteriores. Após os testes, o gerente de desenvolvimento de engenharia reúne os resultados dos testes e aprova ou rejeita as mudanças.

As análises são conduzidas para se identificar claramente o que é necessário ser feito, e para se tornar conhecido as possíveis falhas na funcionalidade do equipamento devido à mudança. Os benefícios proporcionados pelas análises são: maior qualidade e confiabilidade dos produtos, trabalho mais eficiente (foco no trabalho necessário), satisfação superior dos consumidores e declínio de retrabalho.

Um desenvolvimento de produto eficiente e rápido depende da força de trabalho da empresa. Portanto, foi apontado que a maior dificuldade da empresa é ter o funcionário com a habilidade específica para executar as análises.

Além disso, foi levantado que mudanças no produto causam maior probabilidade de falha e que os *recalls* da empresa estão associados às modificações nos produtos. Também foi observado que apesar de existir uma pressão para lançar rapidamente no mercado o novo produto, a empresa prefere ofertar ao cliente um produto robusto a um produto com problemas. Devido a essa política eles têm despendido maior tempo realizando testes.

4.4 Empresa D

A quarta empresa participante do estudo é uma multinacional americana que fabrica compressores herméticos para equipamentos de ar condicionado e refrigeração. Eles aplicam o FMEA tanto para “novos” produtos quanto para produtos “variantes”. Um erro de projeto (*design*) encontrado pelo cliente pode causar para a empresa grandes prejuízos financeiros. Consequentemente, eles reconhecem a necessidade de se aplicar o FMEA.

No entanto, na empresa, o FMEA é usado para se checar a conformidade do projeto. Durante a sessão de um FMEA, são usados protótipos funcionais para auxiliar na visualização das falhas. A sessão é promovida pelo projetista responsável pelo *design* (projeto) do produto, que convoca para a sessão os líderes dos departamentos da qualidade, do processo de fabricação, de suprimentos (se o fornecedor estiver envolvido) e de pesquisa e desenvolvimento (se for um novo produto). No entanto, comumente os líderes não comparecerem as sessões e quando comparecem, não sabem ao certo quais mudanças estão sendo propostas. Muitas sessões são necessárias para realizar o trabalho, já que elas são ineficientes.

As lições aprendidas das análises são documentadas, porém não são recuperadas em análises futuras. Os *recalls* não são frequentes e a maior parte é ocasionada por falhas no processo de fabricação e não por mudanças no projeto do produto.

4.5 Sumários dos resultados encontrados

Os resultados do estudo de casos múltiplos não apenas confirmam que mudanças no projeto (*design*) introduzem falhas potenciais no produto, mas também sugerem a necessidade de trabalho

multidisciplinar, processo estruturado para o gerenciamento de mudanças de engenharia, atribuição de responsabilidades, colaboradores comprometidos e entendimento das mudanças de engenharia.

5 PROPOSTA DE ANÁLISE INTEGRADA DE FALHAS POTENCIAIS

Foi observado tanto na literatura quanto no caso prático, que o FMEA para muitas empresas é uma tarefa a ser realizada na fase de teste e validação do PDP. Isto talvez sirva como uma checagem importante da conformidade do projeto do produto, mas por outro lado, contribui muito pouco para sua melhoria global.

Na análise integrada de falhas o formulário do FMEA deve ser um documento “vivo” no PDP, ou seja, uma vez realizada a análise para um produto, ele deve ser revisado sempre que ocorrerem alterações neste produto ou quando um novo FMEA para um sistema, subsistema ou componente (SSC) semelhante tiver de ser desenvolvido. Para a análise de mudanças no projeto deve-se aplicar o método DRBFM, utilizando os dados do FMEA como referência. E, mesmo que não haja alterações, deve-se regularmente revisar as análises, confrontando-se as falhas potenciais, imaginadas pelo time que aplicou o FMEA, com as que realmente vêm ocorrendo na fase de uso do produto, de forma a permitir a incorporação de falhas imprevistas, bem como a reavaliação, com base em dados objetivos, das falhas já previstas pelo grupo.

5.1 Recomendações gerais para a condução da sessão de análise de falhas

A análise de falhas potenciais deve ser executada em uma sessão por um time multidisciplinar onde o conhecimento é compartilhado. O engenheiro projetista responsável (líder) pelo item, que será analisado, deve conduzir a sessão.

Engenheiros dos departamentos de projeto, avaliação, manufatura, inspeção e materiais podem ser convocados para a sessão de análise. Porém, engenheiros experientes com a intenção de se envolverem ativamente na discussão que a análise promove devem ter prioridade para serem selecionados.

No início da sessão, o líder deve explicar o mecanismo e as funções do item que está sendo analisado, passar uma idéia geral de seu projeto (*design*) e comentar qualquer fator que necessite consideração especial. Os participantes então devem fazer perguntas e/ou comentários sobre qualquer consideração em relação à explicação dada, e discutirem com o líder baseados nas questões levantadas. Esta é uma maneira de garantir entendimento mútuo sobre o item analisado entre os membros do time.

Então a discussão segue com o preenchimento do formulário do FMEA ou do DRBFM. O engenheiro projetista responsável deve encorajar a participação de todos os membros do time em uma discussão ativa, que estimule a percepção de problemas.

Ao final deve ser escrito um relatório resumindo os resultados, as decisões e as ações recomendadas para eliminar ou reduzir o risco das falhas. Além disso, também devem ser incluídos os problemas os quais não foi estabelecido nenhuma ação corretiva. Esse relatório deve ser usado na otimização/correção do projeto (*design*) e nos testes de avaliação e validação do produto.

5.2 Atividades do PDP relacionadas com a análise integrada de falhas

Na fase projeto informacional do PDP, as informações geradas, geralmente pelo método QFD (*Quality Function Deployment*), sobre os requisitos do produto devem ser entradas para a sessão do FMEA.

Na fase projeto conceitual, após ser realizada a síntese da estrutura de funções do produto e da proposição de alternativas de concepções, pode-se aplicar o FMEA nos sistemas identificando problemas potenciais a serem solucionados na definição da concepção do produto. No entanto, se o grau de complexidade e inovação do produto for baixo, já na fase de projeto conceitual pode-se realizar a aplicação do FMEA em um nível mais detalhado do que os sistemas. Na fase de projeto conceitual, dados como relatórios de falhas em campo e históricos ou análises de SSCs similares, devem ser coletados e diagramas de bloco devem ser desenvolvidos para serem utilizados quando se aplicar o FMEA na fase de projeto detalhado.

Na fase projeto detalhado, aplica-se o FMEA para os sistemas, subsistemas e componentes inovadores e o DRBFM para aqueles que são variações dos existentes, antes da liberação dos desenhos finais. Na aplicação do DRBFM, toda e qualquer mudança deve ser avaliada, não importando o risco da falha potencial. Pode-se aplicar o método Análise da Árvore de Falhas (FTA) para apoiar as análises de falhas do FMEA e do DRBFM. O FTA mostra relações lógicas entre uma falha e suas causas, e promove um framework lógico para expressar combinações de falhas entre componentes que podem levar a uma falha do sistema. Para a aplicação desses métodos, uma grande quantidade de informações

deve estar disponível e são geradas após a aplicação, então recomenda-se elaborar listas de verificações de dados de entrada e de saída. Os resultados da aplicação do FMEA e do DRBFM devem refletir nos testes de avaliação e validação.

Finalmente, durante a fase de uso e suporte do produto é conveniente registrar as falhas ocorridas e as relativas condições ou parâmetros que o produto foi submetido para falhar. São informações que podem ser úteis em análises de falhas de projetos variantes ou incrementais e também em projetos que compartilhem SSC do produto que falhou. Além disso, essas informações podem ser usadas para avaliar a assertividade da análise de falhas e para o desenvolvimento de procedimentos de resolução de problemas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como regra geral poder-se-ia estabelecer que o FMEA seja usado no desenvolvimento de projetos do tipo radial e plataforma, e o DRBFM em projetos do tipo incremental e derivado. No entanto, é preferível assumir que para um sistema, subsistema ou componente nunca desenvolvido antes pela empresa, deve-se utilizar o FMEA e para mudanças em SSCs deve-se utilizar o DRBFM, pois um projeto radical pode conter SSCs que a empresa já desenvolveu. Todavia, a análise do DRBFM sempre será executada com base no FMEA que foi desenvolvido para o item que será modificado, e ao final da análise os resultados devem ser exportados para o FMEA, garantindo que não haja informações desatualizadas.

A utilização de softwares específicos para a aplicação do FMEA e do DRBFM pode auxiliar na gestão da documentação e deixar o processo mais ágil, principalmente nas análises de produtos com alta complexidade. No entanto, a decisão de utilizar esses sistemas computacionais ou simples planilhas deve ser feita, sobretudo, levando em consideração a maturidade da empresa em analisar falhas potenciais.

Embora a proposta aqui apresentada seja baseada em métodos e práticas consolidadas, é necessário conduzir futuros casos de pesquisa-ação para aperfeiçoá-la, seguidos de estudos de casos para estabelecer a viabilidade e aplicabilidade da proposta.

A intenção do desenvolvimento da proposta de análise integrada de falhas é de atender às necessidades atuais das empresas, de lançar novos produtos no mercado em ciclos menores e efetivamente garantir a qualidade e confiabilidade de seus novos produtos.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos às empresas que participaram como voluntárias do estudo, aos colegas do Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA) e ao CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Womack J.P. and Jones D.T. and Roos D. *A Máquina que Mudou o Mundo*, 1992 (Editora Campus).
- [2] Clarkson P.J. and Simons C. and Eckert C., Predicting Change Propagation in Complex Design. *Journal of Mechanical Design*, 2004, 126(5), 788-797.
- [3] Gerst M. and Eckert C. and Clarkson P.J. and Lindemann U. Innovation in the Tension of Change and Reuse. In *International Conference on Engineering Design, ICED 01*, Glasgow, UK, 2001, pp.371-378 (Professional Engineering Publishing).
- [4] Lauglaug A.S., Technical-market research: Get customers to collaborate in developing products. *Long Range Planning*, 1993, 26(2), 78-82.
- [5] Eckert C. and Clarkson P.J. and Zanker W., Change and customisation in complex engineering domains. *Research in Engineering Design*, 2004, 15(1), 1-21.
- [6] Schmitt R. and Krippner D. and Hense K. and Schulz T., Keine Angst vor Änderungen! Robustes Design für innovative Produkte. *Qualität und Zuverlässigkeit*, 2007, 52(03), 24 - 26.
- [7] Chao L.P. and Ishii K., Design Process Error Proofing: Failure Modes and Effects Analysis of the Design Process. *Journal of Mechanical Design*, 2007, 129(5), 491 - 551.
- [8] Laurenti R. and Rozenfeld H. An Improved Method of Failure Mode Analysis for Design Changes. In *CIRP Design Conference*, Cranfield, UK, 2009.
- [9] Rhee M. and Haunschild P.R., The Liability of Good Reputation: A Study of Product Recalls in the U.S. Automobile Industry. *Organization Science*, 2006, 17(1), 101-117.

- [10] Bates H. and Holweg M. and Lewis M. and Oliver N., Motor vehicle recalls: Trends, patterns and emerging issues. *Omega*, 2007, 35(2), 202-210.
- [11] Barber B.M. and Darrough M.N., Product Reliability and Firm Value: The Experience of American and Japanese Automakers, 1973-1992. *Journal of Political Economy*, 1996, 104(5), 1084-1099.
- [12] Haunschild P.R. and Rhee M., The Role of Volition in Organizational Learning: The Case of Automotive Product Recalls. *Management Science*, 2004, 50(11), 1545-1560.
- [13] Davidson W.N., III and Worrell D.L., Research Notes and Communications: The Effect of Product Recall Announcements on Shareholder Wealth. *Strategic Management Journal*, 1992, 13(6), 467--473.
- [14] Vezzoli C. and Manzini E. *Design for Environmental Sustainability*, 2008 (Springer).
- [15] Sobek D.K. and Ward A.C. and Linker J.K., Toyota's principles of set-based concurrent engineering. *Sloan Management Review*, 1999, 40(2), 67-83.
- [16] Levin M. and Kalal T. *Improving Product Reliability: Strategies and Implementation*, 2003 (Wiley).
- [17] Kara-Zaitri C. and Keller A.Z. and Barody I. and Fleming P.V. An improved FMEA methodology. In *Reliability and Maintainability Symposium*, Orlando, FL - USA, 1991, pp.248-252 (IEEE press).
- [18] Segismundo A. and Miguel P.A.C., Failure mode and effects analysis (FMEA) in the context of risk management in new product development: A case study in an automotive company. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2008, 25(9), 899-912.
- [19] Rozenfeld H. and Forcellini F.A. and Amaral D.C. and Toledo J.C. and Silva S.L. and Alliprandini D.H. and Scalice R.K. *Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo*, 2006 (Editora Atlas).
- [20] Booker J.D. and Raines M. and Swift K.G. *Designing Capable and Reliable Products*, 2001 (Elsevier).
- [21] Hawkins P.G. and Woollons D.J., Failure modes and effects analysis of complex engineering systems using functional models. *Artificial Intelligence in Engineering*, 1998, 12, 375-397.
- [22] Stamatis D.H. *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*, 1995 (ASQC Quality Press).
- [23] Stone R. and Tumer I. and Stock M., Linking product functionality to historic failures to improve failure analysis in design. *Research in Engineering Design*, 2005, 16(1), 96-108.
- [24] Yin R.K. *Estudo de Caso: Planejamento e Métodos*, 2005 (Bookman).
- [25] Krasich M. Can Failure Modes and Effects Analysis Assure a Reliable Product? In *Reliability and Maintainability Symposium, 2007. RAMS '07. Annual*, 2007, pp.277-281.
- [26] McKinney B.T. FMECA, the right way. In *Reliability and Maintainability Symposium, 1991. Proceedings., Annual*, 1991, pp.253-259.
- [27] Wirth R. and Berthold B. and Krämer A. and Peter G., Knowledge-based support of system analysis for the analysis of Failure modes and effects. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 1996, 9(3), 219--229.
- [28] Grantham Lough K.A. and Stone R.B. and Tumer I.Y., Failure Prevention in Design Through Effective Catalogue Utilization of Historical Failure Events. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2008, 8(5), 469-481
- [29] Hunt J.E. and Pugh D.R. and Price C.J., Failure Mode Effect Analysis: A Practical Application of Functional Modelling. *Applied Artificial Intelligence*, 1995, 9(1), 33-44.
- [30] Price C.J. and Pugh D.R. and Wilson M.S. and Snooke N. The Flame system: automating electrical failure mode and effects analysis (FMEA). In *Reliability and Maintainability Symposium, 1995. Proceedings., Annual*, 1995, pp.90-95.
- [31] Bell D. and Cox L. and Jackson S. and Schaefer P. Using causal reasoning for automated failure modes and effects analysis (FMEA). In *Reliability and Maintainability Symposium, 1992. Proceedings., Annual*, 1992, pp.343-353.
- [32] Shimizu H. and Imagawa T. and Noguchi H. Reliability Problem Prevention Method for Automotive Components - Development of GD3 Activity and DRBFM (Design Review Based Failure Mode). In *International Body Engineering Conference*, 2003, pp.371 - 376 (SAE International).
- [33] *Design Review Based on Failure Modes*. 2005, General Motors Corporation. p. 1-9.

- [34] Shimizu H. and Noguchi H. Reliability Problem Prevention Method of Stimulating Creativity and Visualizing Problems : 2nd Report, Reliability Problem Prevention Method for System Development. In *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C*, 2005, pp.230-237.
- [35] Shimizu H. and Yoshimura T. Reliability Problem Prevention Method of Stimulating Creativity Needed to Notice Problems. In *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C*, 2004, pp.243-250.