

Problemas e melhorias do método FMEA: uma revisão sistemática da literatura

Problems and improvements of the FMEA method: a systematic literature review



Rafael Laurenti ¹
Bruno Domiciano Villari ¹
Henrique Rozenfeld ¹

RESUMO: Durante o produto de desenvolvimento de um produto, o método mais utilizado na indústria para se antecipar falhas de projeto (design) e de seu processo de fabricação é o FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*). No entanto, muitas empresas têm dificuldades de atingir plenamente os benefícios que esse método põe a disposição. Por meio de uma revisão bibliográfica sistemática foram encontrados em 37 problemas e 153 propostas de melhoria para o método FMEA. Os problemas foram agrupados em 10 classes – Definição do risco, Recursos, Integração no processo de desenvolvimento de produto (PDP), Temporal, Cultura organizacional, Gestão de conhecimentos, Procedimentos, Competência, Informações, e Comportamental. Já as propostas de melhoria foram classificadas em Abordagens, Ferramentas, Frameworks, Métodos, Sistemas (software) e Diretrizes. Muitas das melhorias propostas necessitam de avaliação futura para confirmar suas viabilidade e benefícios. Outras oportunidades para trabalhos futuros incluem levantamentos dos problemas e dificuldades da aplicação do FMEA em casos empíricos.

Palavras-chave: FMEA; Problemas; Melhorias; Desenvolvimento de produtos.

ABSTRACT: During the process of designing a product, the most popular method applied for preventing both design and manufacturing failures is the FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) method. Nevertheless, many companies face challenges in achieving the full benefits that can be yield with the application of this method. A systematic literature review found 37 problems and 153 proposals for improving the FMEA method. The problems were categorised in 10 classes: Definition of risk, Resources, integration in the design process, Timing, Organizational culture, Knowledge management, Procedures, Expertise, Information and Behavioural; and the proposals for improving in Approaches, Tools, Frameworks, Methods, Software and Guidelines. Many of proposals for improvement need further assessment for validation their feasibility and benefits. Other opportunities for future research include carrying out empirical research to assess the practical problems in applying the FMEA method.

Keywords: FMEA; Problems; Improvements; Product development.

1. INTRODUÇÃO

O método mais utilizado na indústria para antecipar falhas do produto e do seu processo de fabricação é o FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis* – Análise dos Modos e Efeitos de Falhas) (HAWKINS e WOOLLONS, 1998; STAMATIS, 1995; STONE, TUMER e STOCK, 2005). O FMEA é uma técnica de engenharia utilizada durante o processo de desenvolvimento de produtos para identificar modos de falhas potenciais, seus efeitos e causas, avaliar o risco de cada modo de falha e definir as ações para evitar a ocorrência das falhas.

A origem do FMEA não é um consenso. Pentti e Atte (2002) asseveraram que o método foi desenvolvido e documentado pela primeira vez no procedimento MIL-P-1629 em 1949 pelo Exército dos Estados Unidos. Anos mais tarde esse procedimento serviria de base para elaboração das normas militares MIL-STD-1629 e MIL-STD-1629A, que continuam sendo usadas até os dias de hoje (PENTTI e ATTE, 2002). Outros autores afirmam que o FMEA emergiu em 1963 de estudos feitos pela NASA (*National Aeronautics and*

¹ USP - Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia de Produção
laurentirafael@yahoo.com.br; brunovillari@gmail.com; roz@sc.usp.br

Space Administration), durante o desenvolvimento do projeto Apollo (BERTSCHE, 2008; CLARKE, 2005; JOHNSON e KHAN, 2003; MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009; PUENTE et al., 2002).

Em 1975 o FMEA foi usado no setor nuclear e, em 1978, a Ford Company foi a primeira empresa automotiva a integrar o FMEA em seu conceito de garantia da qualidade (CLARKE, 2005). No início da década de 1980 as empresas automotivas que formam a AIAG (*Automotive Industry Action Group*) incorporaram formalmente o FMEA, por meio da norma QS-9000 (atual ISO/TS 16949), em seus processos de desenvolvimento de produtos. Este movimento foi seguido pela indústria automobilística alemã. O procedimento de aplicação do FMEA definido pela VDA (*Verband der Automobilindustrie – German Association of the Automotive Industry*) é o mais usado na Europa (BERTSCHE, 2008).

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

Apesar da popularidade do método diversos problemas relacionados com sua aplicação e utilidade têm sido reportados na literatura. Alguns desses problemas incluem: falta de termos bem definidos (KARA-ZAITRI et al., 1991; LEE, 2001), problemas na identificação de falhas chave (BEDNARZ e MARRIOTT, 1988), momento de aplicação no ciclo do PDP (KARA-ZAITRI et al., 1991; MCKINNEY, 1991), integração com o PDP (KRASICH, 2007; SHAHIN, 2004; STAMATIS, 1995; WIRTH et al., 1996) e reutilização de conhecimentos sobre falhas (AJAYI e SMART, 2008; GRANTHAM LOUGH, STONE e TUMER, 2008; MCKINNEY, 1991; STONE, TUMER e STOCK, 2005).

Na tentativa de superar os problemas do FMEA, diversas melhorias têm sido propostas. Para automatizar o FMEA e tornar sua aplicação menos laboriosa, foram empregados simulações qualitativas (PRICE et al., 1995) e processo de racionalização causal (*causal reasoning process*) (BELL et al., 1992). Foi dado um passo a frente na automação do FMEA com o desenvolvimento de um conceito que analisa os efeitos de falhas múltiplas significativas (PRICE e TAYLOR, 2002). Foi desenvolvido um software que usa simulação quantitativa (MONTGOMERY e MARKO, 1997) para oferecer resultados precisos para os projetistas. Foram empregadas Redes Bayesianas para construir modelos probabilísticos de grafos acíclicos dirigidos (*directed acyclic graph – DAG*) que representam dependências causais e estatísticas entre estados de sistemas internos e externos (cliente e o mundo) e variáveis de eventos de sistemas físicos (LEE, 2001).

O objetivo deste trabalho é identificar e classificar os problemas e propostas de melhoria para o FMEA descritos na literatura. O método de pesquisa utilizado para se atingir esse objetivo foi a Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS).

O restante do artigo está organizado como se segue: na seção 2 são explicados os conceitos fundamentais para o entendimento do artigo; na seção 3 é apresentada a metodologia para realização do trabalho; na seção 4 são descritos os resultados da RBS; e, por fim, na seção 5 são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2. PROCESSO DE APLICAÇÃO DO FMEA

O FMEA é usado para definir, identificar, e eliminar falhas conhecidas e/ou potenciais de um projeto de produto e/ou de seu processo de fabricação antes que elas cheguem ao cliente (STAMATIS, 1995). Isto é feito em uma sessão de FMEA, onde são reunidas pessoas advindas de diferentes áreas de empresa, com conhecimentos técnicos variados, para se determinar, de maneira sistemática, todos os possíveis modos de falha potencial, os efeitos e as causas de cada modo de falha sobre o desempenho do produto, avaliar os riscos e especificar ações de melhoria (MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009). Vale ressaltar que grupo conta com a presença do responsável pelo projeto/processo e com um facilitador (MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009).

Os resultados das sessões de FMEA são registrados em um formulário, que sempre deve ser revisado e atualizado (AIAG, 2008). Portanto, a execução do FMEA deve ser contínua, acompanhando o ciclo de desenvolvimento do produto, não sendo seu formulário tratado como um documento estático (BERTSCHE,

2008). Desse modo, a evolução do projeto do produto é documentada sistematicamente, e a aplicação do conceito de melhoria contínua é estimulada (FRANCESCHINI e GALETTO, 2001).

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

1. FMEA de sistema (*System FMEA*): usado para analisar sistemas e subsistemas no início do desenvolvimento do conceito e do projeto (*design*). Um FMEA de sistema foca nos modos de falhas potenciais, casados por deficiências do sistema, das funções do sistema. Nas análises são incluídas interações entre sistemas e entre elementos (subsistemas) de um sistema;
2. FMEA de produto (*Design FMEA – DFMEA*): usado para analisar produtos antes de sua liberação para a fabricação. Um DFMEA foca em modos de falha causados por deficiências de projeto do produto (*design*);
3. FMEA de processo (*Process FMEA – PFMEA*): usado para analisar processos de fabricação e montagem. Um PFMEA é focado em modos de falha causados por deficiências de processo de fabricação ou montagem; e
4. FMEA de serviço (*Service FMEA*): usado para analisar serviços antes de eles chegarem ao consumidor. Um FMEA de serviço foca em modos de falha (tarefas, erros, enganos) causados por deficiências do sistema ou do processo.

Para Bertsche (2008), o emprego dos diferentes tipos de FMEA está relacionado com o tipo e complexidade da entidade técnica a ser analisada. Esse autor afirma que os tipos de FMEA mais empregados na indústria são o FMEA de sistema, o DFMEA e o PFMEA. O uso desses três tipos de FMEA é ilustrado na Figura 1.

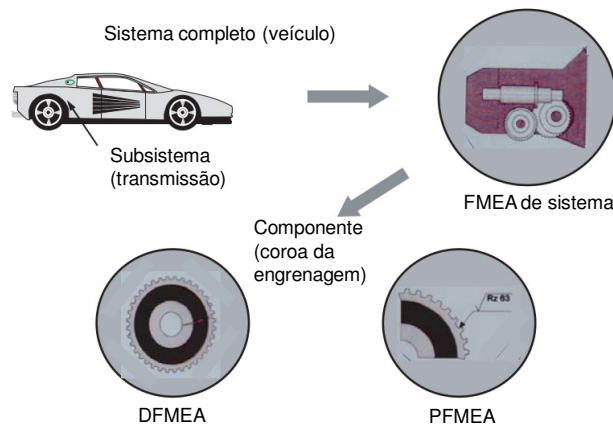


Figura 1 - FMEA de sistema, DFMEA e PFMEA
Fonte: Bertsche (2008)

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

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

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

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

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

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

Uma sessão de FMEA (DFMEA ou PFMEA) se inicia com a identificação de funções e requisitos de um sistema, subsistema, componente ou etapa de um processo de fabricação, conforme o tipo de FMEA (SFMEA, DFMEA ou PFMEA) (BERTSCHE, 2008). Em seguida são determinados todos os modos de falha concebíveis, e os efeitos e causas de cada modo de falha (BERTSCHE, 2008). 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 ou de seus modos (AIAG, 2008). 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 (BERTSCHE, 2008). Então, é 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 (AIAG, 2008). Finalmente, são definidos responsáveis pelas implementações das ações recomendadas, bem como os respectivos prazos para execução (AIAG, 2008).

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 (KRASICH, 2007): 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; evidencia de redução de risco; e medição relativa de redução do risco para cada modo de falha. Na Figura 2 é ilustrada a visão estrutural das informações do FMEA.

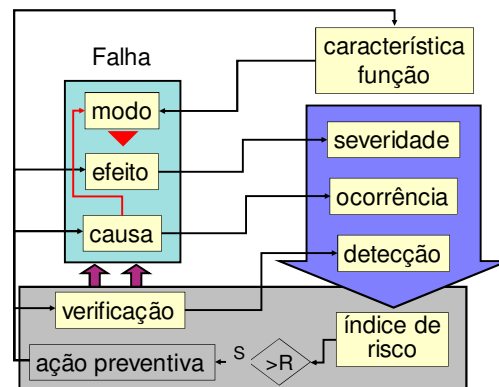


Figura 2 - Visão estrutural das informações do FMEA
Fonte: Rozenfeld *et al.* (2006)

3. MÉTODO DE PESQUISA

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

Assim, o desenvolvimento do conhecimento de um campo ou de uma área passa por diferentes fases que dependem do volume e da maturidade do conhecimento existente. Na fase inicial do desenvolvimento de um campo ou de uma área de conhecimento, são observadas características de estudos exploratórios. Então, após muitos estudos exploratórios com diferentes perspectivas e abordagens, uma base ou plataforma emerge e é possível dizer que o campo ou área entrou na fase descritiva. Os resultados de

pesquisas descritivas tipicamente identificam componentes, padrões, sistemas e estruturas. Em seguida, pesquisadores desenvolvem modelos analíticos explicando como componentes se relacionam entre si. Seguindo a lógica, por meio de estudos causais serão atingidos conhecimentos normativos e será possível entender efeitos causais e prever efeitos de diferentes causas/medidas. As típicas saídas de pesquisas normativas podem incluir *handbooks* com *checklists* e outros tipos de ferramentas para implementação prática. Na realidade, essas saídas finais são difíceis de serem atingidas com validade razoável. Em situações nas quais não se podem definir relações de causa-efeito analíticas, são mais prováveis que se descubram relações causais em situações específicas com base em estudos de caso (KARLSSON, 2009).

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

O procedimento seguido foi o proposto por Biolchini *et al.* (2005). O modelo desses autores é composto das etapas de Planejamento, Execução e Análise. Entre as fases são previstas avaliações, sendo que se os resultados gerados em uma fase não são aprovados, a fase é executada novamente. Desse modo, as três fases ocorrem de maneira iterativa. Os dados são armazenados durante as três etapas. O modelo de Biolchini *et al.* (2005) é representado na Figura 3.

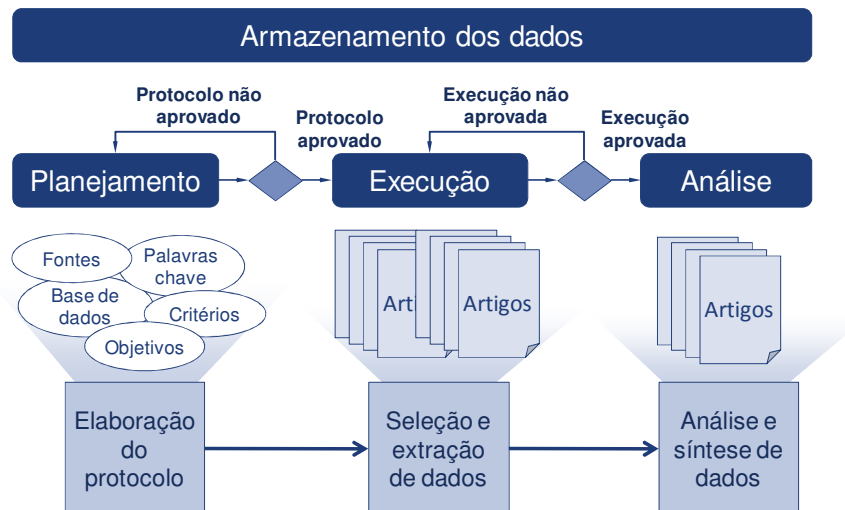


Figura 3 - Processo de Condução de Revisão Sistemática
Fonte: Biolchini *et al.* (2005)

Inicialmente, na etapa de Planejamento, foi elaborado um protocolo para a revisão. No protocolo foram registrados o objetivo da revisão (identificar e classificar problemas do FMEA), questões a serem respondidas (quais problemas da aplicação do FMEA podem ser identificados da literatura?), as fontes de busca (as bases de dados eletrônicas Compendex, Science Direct, Scopus, Web of Science, IEEEExplore e Emerald), os idiomas das publicações (português e inglês), as palavras-chave para as buscas (os *strings* de busca: (FMEA AND *Deficiency*) OR (FMEA AND "*Product development*") OR (FMEA AND *Design*) OR (FMEA AND *Shortcoming*) OR (FMEA AND "*Product design*")), os critérios de inclusão e exclusão das publicações (o texto completo das publicações deve ser acessível via web, e a publicação deve citar pelo menos um problema do FMEA), método de seleção e estratégia de extração de informações.

A etapa de Execução ocorreu nos meses de Dezembro de 2008 a Julho de 2009. Essa etapa compreendeu dois passos, execução da seleção e extração de informações.

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

Para selecionar uma publicação entre os resultados obtidos, aplicou-se o método de seleção definido no protocolo. Esse método foi definido pelos passos de seleção preliminar e seleção final. Na seleção preliminar foi lido o resumo e a conclusão de cada artigo apontado nos resultados das buscas. Caso a publicação atendia aos critérios de inclusão e de exclusão, ele era selecionado para o processo de seleção final. Na seleção final o artigo completo foi lido, e os que atenderem aos mesmos critérios foram selecionados para a extração de informações.

Desse modo, como parte da etapa de seleção preliminar, foram lidos os 2602 resumos, eliminando os trabalhos que nitidamente não citavam problemas do FMEA e não apresentavam uma proposta de melhoria para o método. Da seleção preliminar chegou-se a 123 publicações. Então na seleção final os 123 trabalhos foram lidos por completo, chegando-se a 106 publicações para terem suas informações extraídas. A Tabela 1 mostra o número de publicações encontradas para cada base de dados, o número de publicações selecionadas nas duas etapas de seleção e a porcentagem de publicações selecionadas em relação ao encontrado.

Tabela 1 - Número de artigos encontrados e selecionados

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

Para cada artigo selecionado, como estratégia de extração de informações, foram registrados, em uma planilha, o título da publicação, os autores, tipo de publicação (periódico ou conferência), nome do periódico ou conferência publicado, ano de publicação, país de origem da publicação, nome da base de dados onde o trabalho foi encontrado e a descrição das melhorias propostas (veja Figura 4).

Informações provenientes das publicações selecionadas								
ID	Título da publicação	Autores	Tipo	Local de publicação	Ano	País	Base de Dados	Melhorias proposta
[1]	A decision support tool based on QFD and FMEA for the selection of manufacturing automation technologies	Almannai, B. and Greenough, R. and Kay, J.	Periódico	Robotics and Computer-Integrated Manufacturing	2008	Reino Unido	Compendex	Integração do QFD e FMEA para formar uma ferramenta de tomada de decisão
[2]	Reliability Improvement of a Diesel Engine Using the FMETA Approach	Arcidiacono, Gabriele and Campatelli, Gianni	Periódico	Quality and Reliability Engineering International	2004	Itália	Compendex	FMETA (Failure mode and effect tree analysis), que baseia-se no Design Axiomático (AD) como um quadro metodológico que integra duas técnicas de confiabilidade muito difundidas: FMEA e
[3]	Failure mode identification through clustering analysis	Arunajadai, S.G. and Uder, S.J. and Stone, R.B. and Tumer, I.Y.	Periódico	Qual Reliab Eng Int	2004	Estados Unidos	Scopus	Método chamado projeto livre de falhas, que propõe uma matrix que relaciona falhas com funções, e que pode ser usada como uma base de conhecimento para identificar e analisar falhas em potencial
[4]	Application of failure mode and effect analysis (FMEA), cause and effect analysis and Pareto diagram in conjunction with HACCP to a potato chips manufacturing plant	Arvanitoyannis, I. S. and Varzakas, T. H.	Periódico	International Journal Of Food Science And Technology	2007	Grécia	Web of Science	Metodologia baseada na aplicação do diagrama de peixe levando em consideração o CCPs (critical control points) para determinar os pontos críticos do processo, aplicação do FMEA neste
[5]	Application of ISO 22000 and failure mode and effect analysis (FMEA) for industrial	Arvanitoyannis, I. S. and Varzakas, T. H.	Periódico	Critical Reviews In Food Science And Nutrition	2008	Grécia	Web of Science	Metodologia baseada na aplicação do diagrama de peixe levando em consideração o CCPs (critical control

Figura 4 - Printscreen de parte da tabela de arquivamento das informações extraídas das publicações selecionadas

Para o registro dos problemas do FMEA citados, foi elaborada uma matriz de correlação entre as publicações e os problemas citados. Na primeira coluna da matriz foram inseridos os nomes dos 106 artigos selecionados, e durante a leitura do artigo, quando era citado um problema do FMEA, este último era inserido na primeira linha da matriz. Geralmente um artigo citava mais de um problema e este relacionamento foi feito inserindo o número 1 na célula que era a intersecção entre a linha que representa o artigo e a coluna que representa o problema. Dessa forma, foi possível contabilizar a frequência de aparecimento dos problemas. A Figura 5 mostra um *printscreen* de parte da matriz elaborada.

Nome dos artigos	Deficiências/Problemas do FMEA citados nos artigos															
	Um mesmo valor de RPN pode representar situações caracterizadas por diferentes níveis de risco	Pequenas mudanças nos valores dos índices levam a grandes alterações do RPN	Presença de lacunas na escala de 1 a 1000 do RPN (números primos)	RPN não considera o tamanho do lote para atribuir a probabilidade de ocorrência da causa da falha	Os índices são utilizados como se todos tivessem a mesma importância	O formulário do FMEA não representa todos os dados relevantes provenientes da análise	Falhas múltiplas não são consideradas	Considerado laborioso pelos membros do time	Dificuldade de reunir o time multidisciplinar, fornecedores, e consumidores nas sessões do FMEA	Conflito entre os membros do time na atribuição de valores para os índices	Dependência e da experiência dos membros do time	A realização de um FMEA completo e rigoroso demanda grande quantidade de tempo e recursos	Falta de entendimento da importância do FMEA	Tedioso	Realização tardia no PDP	Fator de risco
A layered approach to automated electrical safety analysis in											1				1	
A new approach for evaluation of risk priorities of failure modes in FMEA	1		1		1											
A revised failure mode and effects analysis model				1	1				1							
A smart failure mode and effect analysis package		1					1	1								
An alternative method for preparing FMECA's										1		1	1		1	
An assessment of RPN prioritization in a failure modes effects and	1	1	1						1		1					

Figura 5 - Printscreen de parte da matriz de relacionamento entre os problemas do FMEA e o nome do artigo que o citou

Por fim, na etapa de Análise as informações extraídas foram analisadas e sintetizadas. Os resultados da etapa de Análise são apresentados a seguir.

4. RESULTADOS

Na análise dos resultados foram usadas quatro variáveis principais para analisar o estado geral da maturidade do conhecimento sobre problemas e propostas de melhoria para o FMEA: número de publicações por ano, país de origem da publicação, local de publicação e tipo de publicação. As Figuras 6 e 7 mostram respectivamente a distribuição por ano (entre 1987 e julho de 2009) e por país dos artigos selecionados.

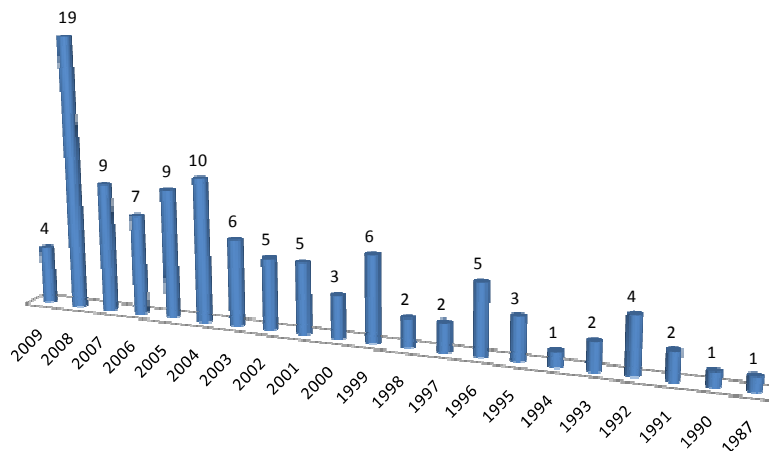


Figura 6 - Distribuição anual dos estudos selecionados

O gráfico da Figura 6 aponta uma tendência crescente do número de publicações na área, incluindo uma concentração de trabalhos entre os anos 2004 a 2008. Já para gráfico da Figura 7 mostra que, de 1987 a julho de 2009, Estados Unidos, Reino Unido e China foram os países que mais publicaram sobre o assunto. Cada um dos países da legenda "Outros" da Figura 7 teve um estudo selecionado. Esses países são: Síria, Suécia, Arábia Saudita, Holanda, França, Espanha e Áustria. Apesar do número crescente de publicações sugerir aumento de maturidade, os tipos (artigo de periódico ou artigo de congresso) e conteúdo dos trabalhos também devem ser considerados.

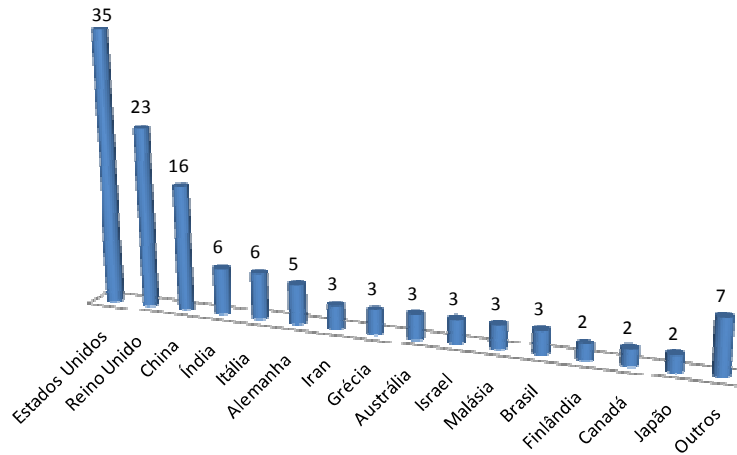


Figura 7 - Distribuição de estudos por país de origem

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

Se referindo aos locais de publicações, dos 54 locais mencionados anteriormente, apenas 10 locais tiveram mais de uma publicação selecionada, totalizando 62 publicações nesses 10 locais. Os demais 44 locais tiveram uma publicação cada. Essa diversidade pode ser parcialmente explicada como o resultado da aplicação do FMEA em diferentes áreas e interesses particulares dos pesquisadores. Na Tabela 2 são mostrados, em ordem crescente de número de publicações selecionadas, os nomes dos locais de publicação.

Tabela 2 - Número de publicações por local de publicação

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

Da análise do conteúdo das 106 publicações, encontrou-se 361 problemas e 161 propostas de melhoria citados para o FMEA. Os 361 problemas foram sumarizados, por semelhança semântica, em 37 problemas, e estes foram agrupados em 10 classes – Definição do risco, Recursos, Integração PDP, Temporal, Cultura organizacional, Gestão de conhecimentos, Procedimentos, Competência, Informações e Comportamental.

A classe Definição do risco considera o cálculo e conceitos que envolvem o RPN e os índices Severidade, Ocorrência e Detecção. A classe Recursos refere-se à alocação de recursos suficientes para a execução do FMEA (materiais, apoio de um facilitador, apoio de um patrocinador, etc.). Integração PDP refere-se à integração da aplicação do FMEA com atividades/métodos/pessoas do processo de desenvolvimento de produtos. A classe Temporal é composta de problemas associados ao momento de aplicação do FMEA no ciclo do PDP. A classe Cultura organizacional considera valores e normas compartilhadas pelos colaboradores que prejudicam a efetividade da aplicação do FMEA. Gestão de conhecimentos compreende problemas de uso/registro/reuso de conhecimentos sobre falhas e ações de melhoria. A classe Procedimentos faz alusão à limitações associadas à execução das tarefas e atividades (operações) do

FMEA. Finalmente, a classe denominada Comportamental é composta de problemas associados aos comportamentos e atitudes dos colaboradores envolvidos na aplicação do FMEA.

A Tabela 3 mostra os 37 problemas, ordenados por frequência de aparecimento nas 106 publicações, e sua respectiva classe.

Tabela 3 - Lista dos problemas ordenados pela frequência de aparecimento nos estudos selecionados da revisão sistemática

Classe	Problema	Frequência
Definição do risco	Os valores dos RPNs (<i>Risk Priority Number</i> – Índice de Prioridade de Risco) não são precisos.	34,91 %
Recursos	A realização de um FMEA completo e rigoroso demanda grande quantidade de tempo e recursos.	31,13 %
Integração PDP	A aplicação do FMEA não é integrada com outros métodos e atividades do PDP.	24,53 %
Temporal	Realizado tarde no PDP.	21,7 %
Definição do risco	Os índices são utilizados como se todos tivessem a mesma importância.	20,75 %
Definição do risco	Um mesmo valor de RPN pode representar situações caracterizadas por diferentes níveis de risco.	19,81 %
Comportamental	É considerado tedioso pelos praticantes.	16,04 %
Definição do risco	Crêterios qualitativos são usados como quantitativos .	15,09 %
Gestão de conhecimentos	Falta de reuso de informações sobre falhas (FMEAs passados e falhas em campo).	14,15 %
Cultura organizacional	É considerado laborioso pelos membros do time.	12,26 %
Procedimentos	Falhas múltiplas não são consideradas.	11,32 %
Competência	Dependente da experiência dos membros do time.	10,38 %
Informações	Dificuldade em definir ações de melhoria adequadas, considerando a viabilidade (restrições), a chance de sucesso (redução do RPN), e os impactos desfavoráveis (nas pessoas, produto, processo, ambiente).	9,43 %
Definição do risco	Dificuldade em estimar os valores para os índices.	8,49 %
Informações	Falta de uma taxonomia padrão.	8,49 %
Procedimentos	Os custos das ações de melhoria não são estimados.	7,55 %
Procedimentos	Os custos de falhas que chegam aos clientes não são estimados.	7,55 %
Definição do risco	Presença de lacunas na escala de 1 a 1000 do RPN (números primos).	6,6 %
Informações	Dificuldade de se obter dados relevantes sobre o projeto do produto/processo.	6,6 %
Procedimentos	O formulário do FMEA não representa todos os dados relevantes da análise.	6,6 %
Definição do risco	Os índices numéricos não são expressivos (não expressam a realidade).	5,66 %
Cultura organizacional	Realizado somente por questões contratuais.	5,66 %
Definição do risco	Pequenas mudanças nos valores dos índices levam à grandes alterações do RPN.	3,77 %
Temporal	Aplicado somente após o protótipo ser construído e testado.	3,77 %
Cultura organizacional	FMEA utilizado para checagem e não para se propor melhorias.	3,77 %
Comportamental	Conflito entre os membros do time na atribuição de valores para os índices.	3,77 %
Procedimentos	Os níveis de complexidade do item de análise não são considerados.	3,77 %
Integração PDP	Dificuldade de reunir o time multidisciplinar, fornecedores, e consumidores nas sessões do FMEA.	2,83 %
Procedimentos	Repetitivo, já que deve estar sempre atualizado.	2,83 %
Procedimentos	Não levados em conta aspectos ambientais na proposição de melhorias.	2,83 %
Definição do risco	RPN não considera o tamanho do lote para atribuir a probabilidade de ocorrência da causa da falha.	1,89 %
Cultura organizacional	Falta de entendimento da importância do FMEA.	1,89 %
Definição do risco	O índice de Severidade é definido pelo projetista e não pelo consumidor.	0,94 %
Procedimentos	Falta de agrupamento de modos de falhas (mecânica, elétrica, etc.).	0,94 %
Procedimentos	Não existem critérios para selecionar itens que serão analisados pelo FMEA.	0,94 %
Procedimentos	Não considera (previne) falhas originadas em diferentes departamentos da organização.	0,94 %
Procedimentos	Não define modos de falhas de sistemas dependentes de tempo-real, tais como falhas que ocorrem muito cedo ou muito tarde em sistemas de segurança (marca-passos, <i>airbags</i> , etc.).	0,94 %

As 161 propostas de melhoria encontradas foram classificadas em Abordagens, Ferramentas, Frameworks, Métodos, Sistemas (software) e Diretrizes. A Figura 8 mostra a distribuição das 161 propostas de melhoria em cada classe. Devido a restrições de espaço, a descrição dessas melhorias não será apresentada neste artigo.

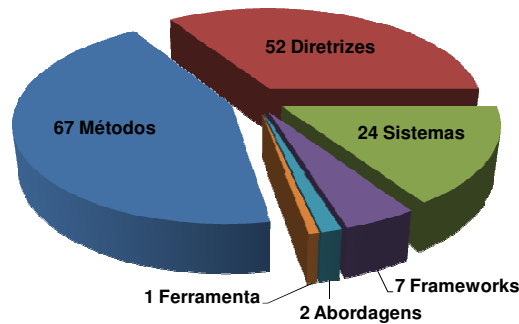


Figura 8 – Quantidade de Abordagens, Ferramentas, Frameworks, Métodos, Sistemas e Diretrizes encontradas na revisão sistemática

De acordo com o exame dos quatro critérios de avaliação (número de publicações por ano, país de origem da publicação, local e tipo de publicação), é possível inferir que a literatura que aborda problemas e melhorias para o FMEA está crescendo e advém de diversos campos de aplicação. Além disso, olhando ao mesmo tempo para quantidade de propostas de melhoria em cada classe e para a diversidade de locais que os trabalhos foram publicados, parece que o campo é dominado por estudos exploratórios e investigações de único caso. O desenvolvimento de trabalhos futuros aplicando em outros casos as melhorias propostas contribuirá para o aprofundamento do conhecimento da área, que poderá ser transferidos e aplicados nos diferentes tipos de indústria.

5. CONCLUSÃO

O FMEA é um método sistemático para se evitar a ocorrência de falhas, que quando aplicado corretamente pode trazer diversos benefícios. Desse modo, muitos dos problemas do FMEA descritos na literatura podem ser os efeitos de não se construir e usar o método corretamente. Além disso, não surpreendentemente, propostas de melhorias para se conseguir o máximo proveito do FMEA estão sendo desenvolvidas em diferentes tipos de indústrias.

Este artigo apresentou uma revisão bibliográfica sistemática que teve o objetivo de se levantar problemas e propostas de melhorias para o método FMEA. A maior limitação do estudo é que seus resultados foram dependentes das publicações que atenderam a critérios específicos de seis bases de dados eletrônicas. Essa pesquisa não tem a pretensão de ser esgotar todos os problemas e melhorias, mas é acreditado que seja abrangente o suficiente para generalizar as conclusões.

De acordo com seus resultados, há uma tendência crescente do número de publicações na área, das quais 58,5% advém de periódicos. No entanto, a maioria foi baseada em estudos de um único caso. Portanto, muitas das melhorias propostas necessitam de validação futura para confirmar suas viabilidades e benefícios. Outras oportunidades para trabalhos futuros incluem levantamentos empíricos dos problemas e dificuldades da aplicação do FMEA em empresas de diferentes tamanhos, setores etc.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos à FAPESP e ao CNPq pelo apoio financeiro para a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

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

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

BEDNARZ, S.; MARRIOTT, D. Efficient analysis for FMEA. RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, Los Angeles, USA, 1988. IEEE Press. 416-421, 1988.

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

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

- BIOLCHINI, J.; MIAN, P. G.; NATALI, A. C. C.; TRAVASSOS, G. H. **Systematic Review in Software Engineering: Relevance and Utility**. PESC-COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 2005.
- BRAUN, P.; PHILIPPS, J.; SCHÄTZ, B.; WAGNER, S. Model-Based Safety-Cases for Software-Intensive Systems. **Electronic Notes in Theoretical Computer Science**, v.238, n.4, p.71-77, 2009.
- CHIOZZA, M. L.; PONZETTI, C. FMEA: A model for reducing medical errors. **Clinica Chimica Acta**, v.404, n.1, p.75-78, 2009.
- CLARKE, C. **Automotive Production Systems and Standardisation: From Ford to the Case of Mercedes-Benz**. Physica-Verlag Heidelberg, 2005.
- DUWE, B.; FUCHS, B. D.; HANSEN-FLASCHEN, J. Failure mode and effects analysis application to critical care medicine. **Critical Care Clinics**, v.21, n.1, p.21-30, 2005.
- FORD, E. C.; GAUDETTE, R.; MYERS, L.; VANDERVER, B.; ENGINEER, L.; ZELLARS, R.; SONG, D. Y.; WONG, J.; DEWEESE, T. L. Evaluation of Safety in a Radiation Oncology Setting Using Failure Mode and Effects Analysis. **International Journal of Radiation Oncology*Biological*Physics**, v.74, n.3, p.852-858, 2009.
- FRANCESCHINI, F.; GALETTO, M. A new approach for evaluation of risk priorities of failure modes in FMEA. **International Journal of Production Research**, v.39, n.13, p.2991 - 3002, 2001.
- GÖNCZY, L.; MAJZIK, I.; HORVÁTH, A.; VARRÓ, D.; BALOGH, A.; MICSKEI, Z.; PATARICZA, A. Tool Support for Engineering Certifiable Software. **Electronic Notes in Theoretical Computer Science**, v.238, n.4, p.79-85, 2009.
- GRANTHAM LOUGH, K. A.; STONE, R. B.; TUMER, I. Y. Failure Prevention in Design Through Effective Catalogue Utilization of Historical Failure Events. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v.8(5), p.469-481 2008.
- GUIMARÃES, A. C. F.; LAPA, C. M. F. Fuzzy FMEA applied to PWR chemical and volume control system. **Progress in Nuclear Energy**, v.44, n.3, p.191-213, 2004.
- HAWKINS, P. G.; WOOLLONS, D. J. Failure modes and effects analysis of complex engineering systems using functional models. **Artificial Intelligence in Engineering**, v.12, p.375-397, 1998.
- JOHNSON, K. G.; KHAN, M. K. A study into the use of the process failure mode and effects analysis (PFMEA) in the automotive industry in the UK. **Journal of Materials Processing Technology**, v.139, n.1-3, p.348-356, 2003.
- KARA-ZAITRI, C.; KELLER, A. Z.; BARODY, I.; FLEMING, P. V. An improved FMEA methodology. RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, Orlando, FL - USA, 1991. IEEE press. 248-252, 1991.
- KARLSSON, C. **Researching Operations Management**. New York:Routledge - Taylor & Francis Group, 2009.
- KITCHENHAM, B. **Procedures for Performing Systematic Reviews, Technical Report TR/SE-0401**. Department of Computer Science, Keele University and National ICT. Australia. 2004.
- KOH, K. Y.; SEONG, P. H. SMV model-based safety analysis of software requirements. **Reliability Engineering & System Safety**, v.94, n.2, p.320-331, 2009.
- KRASICH, M. Can Failure Modes and Effects Analysis Assure a Reliable Product? RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2007. 277-281, 2007.
- LEE, B. Using Bayes belief networks in industrial FMEA modeling and analysis. RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, Philadelphia, 2001. IEEE press. 7-15, 2001.
- MCDERMOTT, R. E.; MIKULAK, R. J.; BEAUREGARD, M. R. **The Basics of FMEA, 2nd Edition**. New York:Productivity Press, 2009.
- MCKINNEY, B. T. FMECA, the right way. RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 1991. 253-259, 1991.
- MILAZZO, M. F.; ANCIONE, G.; LISI, R.; VIANELLO, C.; MASCHIO, G. Risk management of terrorist attacks in the transport of hazardous materials using dynamic geoevents. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v.22, n.5, p.625-633, 2009.

MONTGOMERY, T. A.; MARKO, K. A. Quantitative FMEA automation. *RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM*, Philadelphia, PA, USA, 1997. 226-228, 1997.

MONTI, S.; JEFFERSON, J.; MERMEL, L.; PARENTEAU, S.; KENYON, S.; CIFELLI, B. Use of failure mode and effect analysis (FMEA) to improve active surveillance for methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) at a university-affiliated medical center. **American Journal of Infection Control**, v.33, n.5, p.e158-e158, 2005.

PENTTI, H.; ATTE, H. **Failure mode and effects analysis of software - based automation systems**. STUK - Radiation and Nuclear Safety Authority. Helsinki. 2002.

PRICE, C. J.; TAYLOR, N. S. Automated multiple failure FMEA. **Reliability Engineering & System Safety**, v.76, n.1, p.1-10, 2002.

PRICE, C. J.; PUGH, D. R.; WILSON, M. S.; SNOOKE, N. The Flame system: automating electrical failure mode and effects analysis (FMEA). *RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM*, 1995. 90-95, 1995.

PUENTE, J.; PINO, R.; PRIORE, P.; FUENTE, D. D. L. A decision support system for applying failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.19, n.2, p.137-150, 2002.

RHEE, S. J.; ISHII, K. Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability. **Advanced Engineering Informatics**, v.17, n.3-4, p.179-188, 2003.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F. A.; AMARAL, D. C.; TOLEDO, J. C.; SILVA, S. L.; ALLIPRANDINI, D. H.; SCALICE, R. K. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo**. Editora Atlas, 2006.

SCIPIONI, A.; SACCAROLA, G.; CENTAZZO, A.; ARENA, F. FMEA methodology design, implementation and integration with HACCP system in a food company. **Food Control**, v.13, n.8, p.495-501, 2002.

SCOTT, B. S.; WILCOCK, A. E.; KANETKAR, V. A survey of structured continuous improvement programs in the Canadian food sector. **Food Control**, v.20, n.3, p.209-217, 2009.

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.

SPATH, P. L. Using failure mode and effects analysis to improve patient safety. **AORN**, v.78, n.1, p.15-37, 2003.

STAMATIS, D. H. **Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution**. ASQC Quality Press, 1995.

STONE, R.; TUMER, I.; STOCK, M. Linking product functionality to historic failures to improve failure analysis in design. **Research in Engineering Design**, v.16, n.1, p.96-108, 2005.

THIVEL, P. X.; BULTEL, Y.; DELPECH, F. Risk analysis of a biomass combustion process using MOSAR and FMEA methods. **Journal of Hazardous Materials**, v.151, n.1, p.221-231, 2008.

TRANFIELD, D.; DEYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, v.14, n.3, p.207-202, 2003.

TSAROUHAS, P. H.; ARVANITOYANNIS, I. S.; VARZAKAS, T. H. Reliability and maintainability analysis of cheese (feta) production line in a Greek medium-size company: A case study. **Journal of Food Engineering**, v.94, n.3-4, p.233-240, 2009.

TSAROUHAS, P. H.; ARVANITOYANNIS, I. S.; AMPATZIS, Z. D. A case study of investigating reliability and maintainability in a Greek juice bottling medium size enterprise (MSE). **Journal of Food Engineering**, v.95, n.3, p.479-488, 2009.

WALIA, G. S.; CARVER, J. C. A systematic literature review to identify and classify software requirement errors. **Information and Software Technology**, v.51, n.7, p.1087-1109, 2009.

WIRTH, R.; BERTHOLD, B.; KRÄMER, A.; PETER, G. Knowledge-based support of system analysis for the analysis of Failure modes and effects. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v.9, n.3, p.219-229, 1996.