

## O uso do FMEA como uma métrica para a confiabilidade no Projeto Conceitual

Luiz Fernando Segalin de Andrade (UFSC) [feca@nedip.ufsc.br](mailto:feca@nedip.ufsc.br)

Claiton Rogério Zardo (UFSC) [claitonz@nedip.ufsc.br](mailto:claitonz@nedip.ufsc.br)

Fernando Antônio Forcellini (UFSC) [forcellini@emc.ufsc.br](mailto:forcellini@emc.ufsc.br)

**Resumo:** *Estima-se que até a fase de Projeto Conceitual seja realizado cerca de 20% do trabalho do projeto, sendo estes responsáveis por definir 80% do seu custo. Contudo, apesar da sua importância, ela ainda possui alguns pontos que necessitam de melhorias. Isto se deve ao seu caráter exploratório que acaba tornando-a sujeita a um grau excessivo de subjetividade. Segundo o modelo consensual de desenvolvimento de produtos, o qual é dividido em Projeto Informacional, Conceitual, Preliminar e Detalhado, no Projeto Conceitual, são utilizados métodos de síntese e criatividade que objetivam criar soluções para os problemas de projeto. Também são aplicados métodos de seleção para a escolha da melhor concepção. Para tanto, podem ser utilizados diferentes métodos de avaliação. Todo este processo é feito em reuniões da equipe procurando-se utilizar a experiência da mesma juntamente com critérios multidisciplinares. Porém, o que se percebe é que a dependência da experiência da equipe na seleção do melhor conceito pode acarretar um processo de restrição de soluções inovadoras. Assim, há a necessidade de se buscar novos métodos de avaliação que solucionem este problema. O objetivo deste trabalho é propor uma maneira de utilizar a ferramenta FMEA como auxílio à seleção de concepções com base em critérios de confiabilidade.*

**Palavras Chaves:** *Projeto Conceitual, FMEA, PDP.*

### 1. Introdução

A fase de Projeto Conceitual é um dos pontos críticos do processo de projeto, pois nela são definidos a estrutura e o conceito do projeto. Estima-se que até esta fase seja realizado cerca de 20% do trabalho do projeto, sendo estes responsáveis por definir 80% do seu custo (Back, N. e Forcellini, F. A. 2000). Isto se deve ao fato de até o Projeto Conceitual estar-se trabalhando com a fase abstrata do processo e, a partir dele, parte-se para a fase de concretização do produto. Contudo, apesar da importância que esta fase apresenta, ela ainda possui alguns pontos que necessitam de melhor definição.

Se forem investigados os métodos utilizados e/ou sugeridos na bibliografia para a fase pode-se observar o alto grau de subjetividade envolvido nos mesmos. Esta subjetividade, de certa forma, é benéfica ao projeto, pois a criatividade do projetista é uma característica individual e é ela que proporciona a possibilidade de surgimento das inovações. Entretanto, quando as idéias já estão explicitadas, a subjetividade como instrumento de avaliação e seleção pode ser nociva ao projeto. Isto ocorre porque a seleção é feita com base nas experiências do projetista ou da equipe de projeto ou mesmo no caráter afetivo que os mesmos podem ter para com algumas concepções. Quando se trata de projetos inovadores a equipe opta, muitas vezes, por escolher sistemas que já são de seu conhecimento, e que, segundo suas experiências, funcionam adequadamente. Este tipo de procedimento acaba por deixar de lado idéias novas, não por estas não funcionarem, mas por falta de conhecimento a seu respeito. Assim, devido ao caráter exploratório da etapa de Projeto Conceitual com seus métodos de criatividade e seleção, esta acaba tornando-se sujeita a um grau excessivo de subjetividade tornando-se,

além da fase de maior criatividade, a de maior desperdício de informações, inovações e conhecimento.

Com base no acima exposto pode-se fazer uma análise crítica desta fase quanto às ferramentas e atividades envolvidas. Segundo o modelo consensual (Ferreira, 1997 e Ogliari, 2000), nesta fase são utilizados os métodos da Estruturação Funcional, cujo objetivo é desdobrar a Função Global do produto em funções parciais até o nível das estruturas elementares, dividindo assim o problema de projeto em vários subproblemas para determinação das possíveis estruturas funcionais para o produto. Esta ferramenta possibilita um maior entendimento do projeto como um todo e uma melhor visualização de quais os reais pontos a serem resolvidos do mesmo. Realizado o desdobramento das funções geram-se estruturas alternativas pela utilização de métodos de criatividade. Estas estruturas alternativas possibilitam a inovação do produto, uma vez que permitem a utilização de novos arranjos de estrutura que podem implicar em novos conceitos posteriormente. Este tipo de atividade, por ser realizada num nível abstrato, facilita a inovação e, portanto, é de grande valia para o projeto. No entanto, no momento de serem estabelecidas diferentes estruturas surgem os problemas de seleção da melhor estrutura para o produto e, também por estar num nível razoavelmente abstrato, a equipe pode ter dificuldades de avaliação de qual a melhor estrutura para o problema de projeto.

Na seqüência do modelo são gerados os princípios de solução. Para tal atividade é utilizada a ferramenta da Matriz Morfológica a qual consiste de uma matriz que relaciona em sua primeira coluna as funções elementares retiradas da estrutura funcional e enumera nas colunas restantes e nas respectivas linhas os princípios de solução associados às funções. Este método pode ser utilizado em combinação com diversos métodos de criatividade como, por exemplo, o *Brainstorming*. O objetivo da ferramenta é oferecer a possibilidade de serem visualizados todos os princípios gerados na mesma matriz e em seguida gerar o maior número de concepções possível combinando um princípio de cada função. Por meio das combinações pode-se gerar, conforme a complexidade do projeto, milhares ou mesmo milhões de concepções. Entretanto, devido à inviabilidade de análise e mesmo de representação destas concepções torna-se necessário restringir o seu número. Para tanto, faz-se uma análise crítica dos princípios de solução enumerados e aqueles considerados mais relevantes pela equipe são utilizados nas combinações. Nota-se que esta avaliação possui um caráter subjetivo o que pode implicar na escolha de princípios já conhecidos pela equipe de projeto em detrimento de princípios possivelmente inovadores.

A atividade seguinte é a de seleção da melhor concepção. Esta atividade tem como objetivo escolher dentre as concepções geradas a melhor concepção para o produto. Para tanto, utilizam-se julgamentos de viabilidade e disponibilidade tecnológica além das especificações de projeto e necessidades dos clientes. Todo este processo é feito em reuniões da equipe procurando-se utilizar a experiência da mesma juntamente com critérios multidisciplinares. No entanto, o que se percebe com a experiência é o alto grau de subjetividade envolvido e, conseqüentemente a alta probabilidade de escolha de uma opção que não seria a melhor.

Assim, há a necessidade de se buscar novos métodos de avaliação de princípios de solução, combinação destes em concepções e mesmo de seleção da melhor concepção. O objetivo deste trabalho é propor um método que auxilie nestas tarefas com base em critérios de confiabilidade utilizando-se para tanto da ferramenta FMEA, a qual possibilita a execução de projeto integrado dentro dos preceitos da Engenharia Simultânea. Outro aspecto relevante é o fato de antecipar algumas atividades da fase de Projeto Preliminar passando-as para a de Projeto Conceitual com o intuito de estabelecer critérios mais palpáveis e menos subjetivos para a seleção das concepções. Espera-se que este procedimento tenha como resultado reduzir o número de iterações durante o decorrer do projeto.

## 2. Desenvolvimento

O método de Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) foi desenvolvido com o intuito de auxiliar no diagnóstico e previsão de falhas de equipamentos. Ele é um método analítico padronizado para detectar e eliminar problemas potenciais de forma sistemática e completa (Helman, 1995 apud Ferrari, Martins e Toledo, 2001). Além disso, é uma ferramenta que utiliza o conhecimento dos membros do PDP sobre problemas de qualidade e desempenho do produto advindos do seu projeto ou processo de produção. O FMEA permite a hierarquização das causas dos problemas e estabelece parâmetros para a adoção de medidas preventivas ou corretivas (Helman, 1995 apud Ferrari, Martins e Toledo, 2001). Outra definição é apresentada por Sakurada (2001) segundo o qual FMEA *"é um método qualitativo que estuda os possíveis modos de falha dos componentes, sistemas, projetos e processos e os respectivos efeitos gerados por esses modos de falha"*.

Por causa do seu caráter preditivo, o FMEA passou a ser utilizado na fase de projeto de produtos. Isto porque ao aplicar um FMEA durante o projeto pode-se prever os pontos críticos do mesmo fazendo com que a equipe, por meio de análises de modos de falha e efeitos defina ações corretivas durante o projeto, prioridades no dimensionamento e seleção de materiais de cada componente. Contudo, a aplicação do FMEA ainda é questionada por muitas organizações. Segundo Tumer, Stone e Bell (2003) ele é considerado *"trabalhoso e com custos tanto em termos econômicos quanto em relação ao tempo. Além disso, muitas aplicações têm tido resultados insatisfatórios na sua aplicação devido a descrições inconsistentes das funções dos componentes do sistema e das falhas as quais eles estão sujeitos"*. Apesar disso, os autores colocam que *"o aumento da importância das métricas de confiabilidade vem abastecendo o aprimoramento dos métodos de previsão, especialmente aqueles utilizados em novos projetos"*.

Isto acaba por demonstrar a necessidade de se aprimorar o FMEA quanto a sua aplicabilidade. Tal aplicabilidade pode ser melhorada por iniciativas com a de Arcidiacono, Campatelli e Citti (2003) os quais utilizam o FMEA em conjunto com outras técnicas de projeto nas fases iniciais do PDP. Devido a este adiantamento da utilização do FMEA os autores afirmam que ocorre uma simplificação na sua aplicação, pois muitos modos de falha são evitados devido aos esforços serem despendidos antes que se construa um protótipo, por exemplo. Considerando-se que atualmente este método é utilizado na fase de Projeto Preliminar, e, considerando ainda, o modelo apresentado por aqueles autores pode-se identificar que, devido ao FMEA implicar em previsões de funcionamento, ele é perfeitamente passível de utilização no Projeto Conceitual.

Um exemplo disso é que ao se fazer uma análise das atuais metodologias percebe-se que são escolhidas as concepções do produto sem que seja feita uma análise crítica e explícita destas. Além disso, a utilização do FMEA apenas no Projeto Preliminar torna o mesmo um mero instrumento de otimização quando poderia ser mais bem explorado em suas possibilidades como no auxílio à seleção de concepções.

Quanto a sua aplicação no Projeto Conceitual o FMEA possui a vantagem de detectar o problema mais cedo e, assim, resolvê-lo com o menor custo possível. Porém, o método apresenta a desvantagem de possuir poucas informações disponíveis, o que pode representar uma fonte de incertezas. Apesar disso, considerando-se que o mesmo deve ser aplicado num ambiente de desenvolvimento integrado de produto, acredita-se que muitos dos conhecimentos tácitos da equipe de projeto possam ser externalizados pela sua aplicação.

Assim, segue a descrição do método proposto.

## 3. Descrição do método

O método proposto consiste da utilização do FMEA juntamente com a Matriz Morfológica. Ele é semelhante à Matriz EDM apresentada por Arcidiacono, Campatelli e Citti (2003) na qual os autores associam as funções com requisitos de confiabilidade através da aplicação do FMEA e da Árvore de falhas (FTA). A diferença para o método aqui proposto é que os autores utilizaram a Abordagem Axiomática para o desenvolvimento do produto associando parâmetros ainda mais abstratos que os pretendidos por este trabalho.

O método axiomático utiliza os parâmetros de confiabilidade juntamente com a Matriz de projeto expandida (EDM) mostrada na **Figura 1**. Isto permite fazer uma análise mais criteriosa e fácil do conjunto de informações pois estas permanecem visíveis ao projetista. Nela são enumerados os requisitos funcionais (RFi) na primeira coluna e os parâmetros de projeto (DPi) na primeira linha. Os campos de inter-relacionamento são divididos em quatro áreas: a área azul (superior esquerda) equivale à existência ou não de relacionamento do DP com o RF, a área verde (superior direita) contém o valor obtido pela análise do FMEA e corresponde ao valor da importância relativa dos requisitos funcionais e a região azul (inferior direita) apresenta o tipo de relacionamento detectado na FTA.

Por meio deste método pode-se fazer uma análise prévia de confiabilidade do produto num nível mais alto, ou seja, num nível de sistema. Isto permite que alguns problemas que seriam detectados apenas num FMEA a posteriori sejam identificados e corrigidos ainda numa fase inicial do desenvolvimento do produto.

	DP <sub>1</sub>		DP <sub>2</sub>		DP <sub>3</sub>	
FR <sub>1</sub>	X	6,120	0	R	0	--
	1	OR	0	OR	0	AND DP <sub>12</sub>
FR <sub>2</sub>	X	--	X	7,84	0	--
	0.4	AND DP <sub>22</sub>	1	OR	0	--
FR <sub>3</sub>	0	--	X	--	X	5,100
	0	--	0.7	--	1	OR

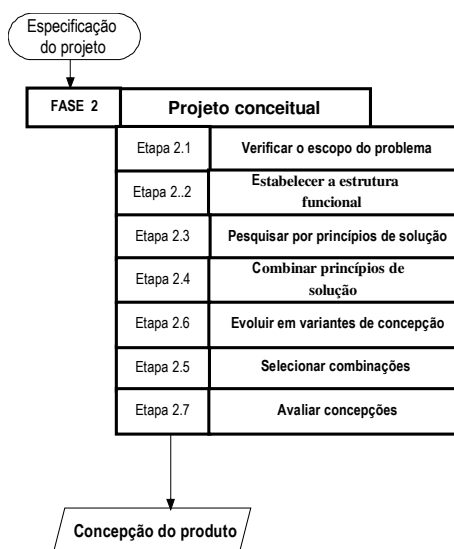
Funcional	FMEA (Severity, RPN)
FA (relative importance)	FTA

← EDM legenda

**Figura 1:** Matriz de projeto expandida (EDM), (Arcidiacono, Campatelli, Citti; 2003)

A partir deste método desenvolveu-se uma matriz morfológica semelhante. No caso em questão foi utilizado o modelo consensual de projeto cuja fase de Projeto Conceitual está mostrada na **Figura 2**. A partir deste modelo percebe-se que após a Estruturação Funcional do produto são gerados os Princípios de Solução (PS) com o auxílio da Matriz Morfológica (MM) e os mesmos são combinados em diferentes concepções. Estas por sua vez são avaliadas em termos de viabilidade, disponibilidade tecnológica e em relação ao atendimento ou não das Especificações de Projeto.

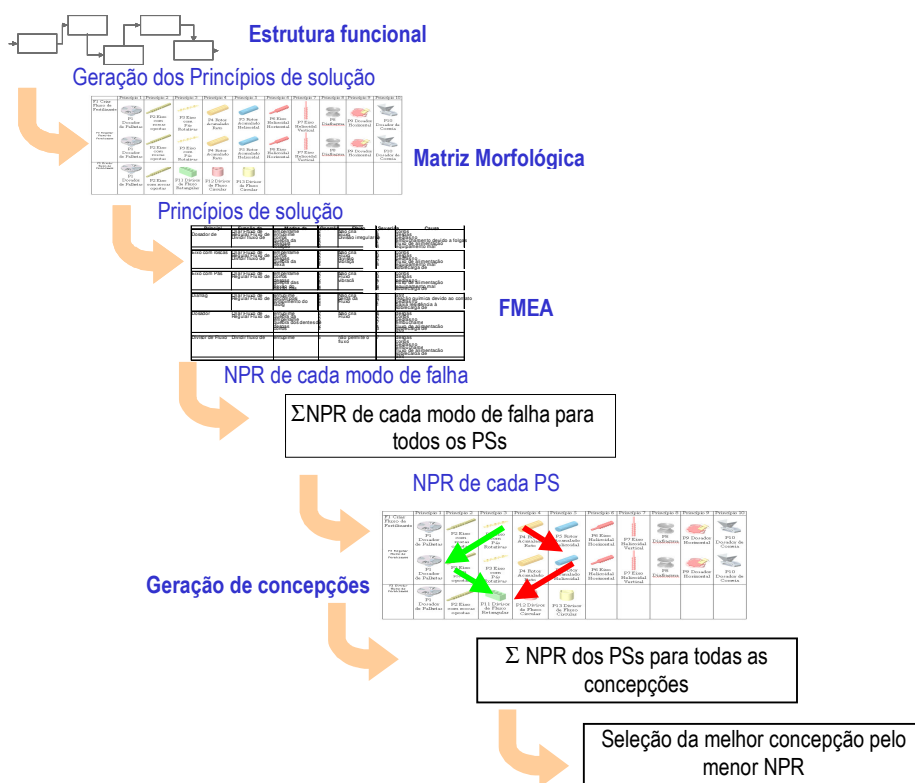
A proposta apresentada está inserida na Matriz Morfológica e busca reduzir o número de combinações a serem avaliadas por meio de uma triagem prévia de princípios baseada em critérios de confiabilidade. Para tanto, este trabalho sugere a aplicação do FMEA para todos os PS tão logo a MM esteja montada. Ao ser aplicado o FMEA dos PSs são obtidos os NPRs para cada modo de falha os quais são somados para a obtenção do NPR do PS. Com o valor dos NPRs de cada PS são feitas as combinações entre os PSs. Soma-se, então, os valores dos NPRs de todos os PSs de modo a obter o valor do NPR de cada concepção. Esta seqüência está representada na **Figura 3**.



**Figura 2:** Fase de Projeto Conceitual (Ferreira, 1997 e Ogliari, 1999)

Como auxílio para o desenvolvimento destas tarefas é sugerida a inserção de colunas com os valores dos NPRs de cada PS ao lado dos mesmos na MM. Isto torna mais fácil para o projetista associar os valores dos NPRs na etapa de combinação dos PSs.

Este procedimento é apenas um indicativo que pode auxiliar nas decisões de projeto. Além disso, o próprio desconhecimento da equipe, principalmente em novos projetos pode ter influência negativa nestas decisões. Outro aspecto que deve ser levado em conta é que os diferentes sistemas também deverão ser unidos de alguma maneira o que tende a acarretar em novos modos de falha. Estes modos de falha, entretanto, devem ser detectados em uma fase mais avançada do projeto pela aplicação de um FMEA mais detalhado.



**Figura 3:** Modelo esquemático da aplicação do FMEA no Projeto Conceitual

Com base neste método foi elaborado um estudo de caso com o intuito de verificar a validade do método, o qual está descrito a seguir.

#### 4. Estudo de caso

Para a avaliação do método foi utilizado um estudo de caso cujo objetivo era verificar a aplicabilidade do modelo proposto. Este estudo de caso foi elaborado com fins didáticos, não tendo todos os requisitos apontados por Sakurada (2001) para a elaboração do FMEA. Por isso, foi utilizada parte da MM de um equipamento de dosagem de adubo mostrado na **Figura 4**.

Com base nos PSs existentes na MM foi elaborado um FMEA para cada um dos PSs. Um exemplo do FMEA desenvolvido encontra-se no **Quadro 1**.

Princípios	Função do princípio	Modos de falha	Ocorrência	Efeitos	Severidade	Causas	Detecção	NPR
Eixo com roscas opostas	Criar Fluxo de Fertilizante	emperramento	2	Não cria fluxo	7	corrosão	8	112
	Regular Fluxo de Fertilizante	corrosão	2	Fluxo irregular	3	desgaste	2	12
	Dividir fluxo de Fertilizante	desgaste	2	divisão irregular	1	pedras no fertilizante	2	4
		quebra da rosca	6	vibração	7	fluxo de alimentação irregular	8	336
		flexão	4		4	equipamento mal ajustado	5	80
						sobrecarga de fertilizante		

**Quadro 1:** Exemplo da planilha do FMEA para dosador de adubo

Assim, foram obtidos os valores dos NPRs para cada um dos modos de falha de cada um dos PSs. Estes, por sua vez, foram somados para a obtenção dos valores dos NPRs dos PSs. Os valores obtidos encontram-se no **Quadro 2**.

Princípios	NPR dos Princípios
Dosador de Palhetas	552
Eixo com roscas opostas	544
Eixo com Pás Rotativas	704
Diafragma	555
Dosador Horizontal	388
Divisor de Fluxo Retangular	280

**Quadro 2:** Valores dos NPRs dos Princípios de solução

Estes valores também foram inseridos na Matriz Morfológica modificada com a finalidade de facilitar a visualização dos valores na tarefa de combinação conforme mostrado na **Figura 4**.

FUNÇÕES	PRINCÍPIOS DE SOLUÇÃO									
	Princípio 1	NPR	Princípio 2	NPR	Princípio 3	NPR	Princípio 4	NPR	Princípio 5	NPR
F1 Criar Fluxo de Fertilizante	 P1 Dosador de Palhetas	552	 P2 Eixo com roscas opostas	544	 P3 Eixo com Pás Rotativas	704	 P8 Diafragma	555	 P9 Dosador Horizontal	388
F2 Regular Fluxo de Fertilizante	 P1 Dosador de Palhetas	552	 P2 Eixo com roscas opostas	544	 P3 Eixo com Pás Rotativas	704	 P8 Diafragma	555	 P9 Dosador Horizontal	388
F3 Dividir fluxo de Fertilizante	 P1 Dosador de Palhetas	552	 P2 Eixo com roscas opostas	544	 P11 Divisor de Fluxo Retangular	280				

**Figura 4:** Matriz Morfológica Modificada com os valores dos NPRs para cada princípio de solução do dosador de adubo

Por fim, foi feita a combinação dos PSs para a obtenção das concepções para o produto. Foram então somados os NPRs dos PSs de cada concepção e chegou-se aos NPRs das concepções os quais estão mostrados no **Quadro 3**.

Concepções	Princípios combinados	NPR Concepção
Concepção 1	Dosador de palhetas	552
Concepção 2	Eixo com roscas opostas	544
Concepção 3	Eixo com pás rotativas + Divisor de fluxo retangular	984
Concepção 4	Diafragma + Divisor de fluxo retangular	835
Concepção 5	Dosador horizontal + Divisor de fluxo retangular	668

**Quadro 3:** Valores dos NPRs das concepções

Com base nos valores obtidos pode-se identificar que as melhores concepções são aquelas que apresentam os menores valores de NPR. Isto indica que possuem índices de Ocorrência, Severidade e Detecção dos modos de falha apontados pelo FMEA menores que as outras concepções. Assim, as melhores alternativas para o projeto, sob o enfoque da confiabilidade, seriam as concepções 1 e 2.

Outro ponto a ser destacado é que as concepções que foram formadas por PSs que abrangiam todas as funções tenderam a ter um NPR total menor que as concepções formadas por mais de um PS. Acredita-se que por agregarem mais de um PS, as concepções compostas por estes agregam os valores dos respectivos NPRs, de forma semelhante a um sistema de confiabilidade em série. Entretanto, este pode ter sido um caso particular o que implica dizer que há necessidade de serem realizadas mais aplicações do método.

## 5. Conclusões

A partir do estudo realizado pode-se identificar alguns aspectos relevantes.

A antecipação de tarefas antes executadas no Projeto Preliminar tem se tornado mais freqüente nos últimos anos. Acredita-se que isto se deva à prática corrente de ambientes multidisciplinares e do desenvolvimento de novas filosofias de gestão como a Gestão do Conhecimento. Todo este contexto cria uma necessidade de aprimoramento das técnicas de projeto tornando o mesmo mais compacto e dinâmico causando a referida antecipação. Assim, a aplicação do FMEA (e de outras técnicas) no Projeto Conceitual passa a não ser uma revolução uma vez que há um contexto potencializador em termos de pesquisas.

Quanto aos resultados obtidos através deste estudo pôde-se identificar alguns pontos no método apresentado a serem discutidos:

- A métrica proposta precisa ser aplicada de uma forma mais integrada com outros aspectos do produto com a funcionalidade e a manufatura.
- Também deve ser aplicada em outros estudos de caso de modo a obter-se dados mais concretos de sua aplicação, para, então ser feita uma análise das necessidades de ajustes.
- Pode ser necessário, principalmente por estar-se lidando com aspectos de confiabilidade, a utilização de métodos estatísticos associados à métrica proposta.
- É preciso fazer um estudo de caso mais completo buscando analisar possíveis influências da Estrutura Funcional do produto com seus fluxos de energia, material e sinal no procedimento descrito.

Dessa forma, acredita-se que, por meio de maior quantidade de dados práticos, os pontos duvidosos do trabalho serão elucidados tornando possível e enriquecedora a utilização do FMEA no Projeto Conceitual.

## 6. Referências bibliográficas

- BACK, N. e FORCELLINI, F. A. **Projeto de produtos**. Florianópolis, 2000. Apostila Disciplina de Projeto Conceitual, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- FERRARI, F. M., MARTINS, R. A. e TOLEDO, J. C. Ferramentas do processo de desenvolvimento do produto como mecanismos potencializadores da gestão do conhecimento. In: Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, 3º, 2001, Florianópolis - SC. **Anais do 3º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto**. Florianópolis: UFSC, Setembro de 2001. CD-ROM.
- FERREIRA, M. G. G. **Utilização de modelos para a representação de produtos no projeto conceitual**. Programa de Pós-graduação em Eng. Mecânica, UFSC, 1997. Dissertação de Mestrado.
- OGLIARI, A. **Sistematização da concepção de produtos auxiliada por computador com aplicações no domínio de componentes de plástico injetados**. Programa de Pós-graduação em Eng. Mecânica, UFSC, 1999. Tese de Doutorado.
- SAKURADA, E.Y.. **As técnicas de Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos**. Programa de Pós-graduação em Eng. Mecânica, UFSC, 2001. Dissertação de Mestrado.
- ARCIDIACONO, G. , CAMPATELLI, G. , CITTI, P.. Systematic approach to product design using axiomatic design: Application to a diesel locomotive. In: International Conference on Engineering Design – ICED 03, 14th - 2003, Estocolmo - SUE. **ICED 03 - Proceedings**. Estocolmo, Suécia: Design Society, Agosto de 2003. CD-ROM.
- TUMER, I. Y., STONE, R. B., BELL, D. G.. Requirements for a Failure Mode taxonomy for use in Conceptual Design. In: International Conference on Engineering Design – ICED 03, 14th - 2003, Estocolmo - SUE. **ICED 03 - Proceedings**. Estocolmo, Suécia: Design Society, Agosto de 2003. CD-ROM.