

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica

As técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos

Dissertação submetida à Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do grau
de Mestre em Engenharia Mecânica

Eduardo Yuji Sakurada

Florianópolis, abril de 2001

AS TÉCNICAS DE ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS E
ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHAS NO DESENVOLVIMENTO E NA AVALIAÇÃO
DE PRODUTOS

Eduardo Yuji Sakurada

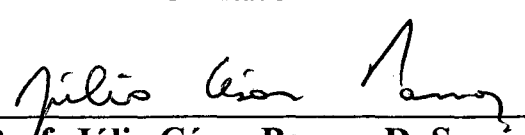
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
PROJETO DE SISTEMAS MECÂNICOS, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

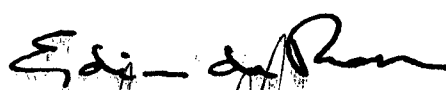


Prof. Acires Dias, Dr. Eng.
Orientador



Prof. Júlio César Passos, D. Sc.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora



Prof. Edison Da Rosa, Dr. Eng.



Prof. Fernando A. Forcellini, Dr. Eng.



Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D.

**Aos meus pais que sempre estiveram
comigo ajudando a superar as dificuldades
encontradas no caminho.**

AGRADECIMENTOS

Ao orientador e amigo Prof. Acires Dias pela compreensão, confiança e paciência. Muito obrigado.

Aos professores que participaram da banca pelas correções e observações, que colaboraram para a melhoria do trabalho.

Aos amigos do GRANTE – Jucélio, Cláudio, Fancello, Lauro, Galo, Sandro, Novotny, Márcio, Linhares, Raimundo, Alvino, Fabrício.

À amiga Giovana por ter ajudado a escrever o *Abstract*.

Aos amigos do NeDIP – Giovano, Juscelino, Valdeon, Dors, Leolima, Antônio Carlos (ACPB), Romano, Roberto, Airton, Cristiano, Giovane, Tiago, Feca, Luciano.

Aos amigos que participaram nos estudos de caso: Vinadé, Adriane, Guilherme, Wanilson, Ângelo e o Prof. Augusto Weis.

Ao pessoal da república – Noel, André, e principalmente, Tião por ter deixado ficar com o quarto até o período da defesa da dissertação.

Aos amigos Cícero Mariano e Sérgio Marquezi.

Aos meus irmãos e irmã.

À Yutaka pela paciência, confiança e carinho.

Ao Haru e a Elina por estarem sempre perto ajudando em tudo.

À CAPES pelo apoio financeiro concedido para este trabalho.

ÍNDICE

Capítulo 1 – Introdução

1.1	Objetivos e Contribuições.....	2
1.2	Metodologia de projeto para sistemas modulares	4
1.3	As ferramentas de análise de falhas	7
1.4	Conteúdo dos capítulos.....	8

Capítulo 2 – Métodos para a análise da confiabilidade em sistemas

2.1	Introdução	9
2.2	Equação para união de eventos independentes e não mutuamente exclusivos	10
2.3	Método da Probabilidade Condicional	11
2.4	Método do Grupo de Corte	17
2.5	Método do Grupo de Ligação	19
2.6	Árvore de Eventos	22
2.7	Método da Matriz Conexão	28
	2.7.1 Método da eliminação de nós	29
	2.7.2 Método da multiplicação da matriz.....	31
2.8	Comentários	32

Capítulo 3 – Métodos de Análise da Árvore de Falhas (FTA) e o Diagrama de Ishikawa

3.1	Introdução	34
3.2	Diagrama de Ishikawa	34
3.3	O Método da Análise da Árvore de Falhas - FTA	37
3.4	Estrutura básica de uma árvore de falhas	38
	3.4.1 Nível hierárquico.....	39
	3.4.2 Representação de portas lógicas	39
	3.4.3 Representação de eventos.....	40
3.5	Exemplo de uma árvore de falhas	42
3.6	Procedimento para a construção da árvore de falhas.....	44
3.7	FTA automatizados	45

3.8	Comentários	45
-----	-------------------	----

Capítulo 4 – FMEA – Análise do Modo de Falha e seus Efeitos

4.1	Introdução	47
4.2	Histórico.....	47
4.3	Áreas de utilização do FMEA atualmente	48
4.4	Definições	49
4.5	O que é o FMEA	52
4.6	O que é o FMECA.....	53
4.7	Como avança o FMEA/FMECA na análise da falha.....	60
4.8	Quando iniciar um FMEA/FMECA.....	62
4.9	Aplicações do FMEA/FMECA.....	64
4.10	A equipe participante do FMEA/FMECA.....	66
4.11	Procedimento geral para a execução do FMEA/FMECA.....	68
4.12	Resultados e benefícios obtidos com o FMEA/FMECA.....	73
4.13	Comentários	74

Capítulo 5 – Aplicação do FMEA e FTA na análise e desenvolvimento de produtos

5.1	Introdução	75
5.2	Análise dos modos de falhas e seus efeitos na bomba de engrenagens externas.....	75
5.2.1	Análise da bomba de engrenagens como um sistema	78
5.2.1.1	Seleção dos componentes e descrição das funções	78
5.2.1.2	Identificação dos modos de falha de cada componente e efeitos na bomba de engrenagens.	79
5.2.1.3	Identificação das causas dos modos de falha.....	81
5.2.1.4	Resultados obtidos e Comentários	82
5.2.2	Análise da bomba de engrenagens como um componente de um sistema hidráulico.....	84
5.2.2.1	Seleção dos componentes e descrição das funções.....	85
5.2.2.2	Identificação dos modos de falha da bomba de engrenagens e efeitos no sistema hidráulico.....	85
5.2.2.3	Identificação das causas dos modos de falha	87

5.2.2.4	Resultados obtidos e Comentários.....	88
5.3	Análise do modo de falha e seus efeitos no protótipo da transplantadora de mudas	89
5.3.1	Reuniões do FMEA para análise da transplantadora	90
5.3.2	Estudo do modelo físico e seleção dos principais itens e funções.....	91
5.3.3	Identificação dos modos de falha e seus efeitos	97
5.3.4	Seleção dos efeitos mais importantes e levantamento das causas dos modos de falha.....	99
5.3.5	Apresentação das possíveis soluções com base nos efeitos, modos e causas das falhas.....	100
5.3.6	Resultados obtidos e comentários	101
5.4	Uso de árvores de falha para representar eventos de falha em sistemas hidráulicos com vistas à aquisição do conhecimento.....	103
5.4.1	O estudo do sistema hidráulico	104
5.4.2	Ferramentas para a representação do conhecimento.....	105
5.4.3	Resultados obtidos e comentários	109
5.5	Comentários finais.....	109

Capítulo 6 – Conclusões e recomendações

6.1	Introdução	112
6.2	Diagrama de Ishikawa	113
6.3	FTA.....	115
6.4	FMEA	116
6.5	Conclusões	117
6.6	Recomendações.....	119

Referências Bibliográficas	120
----------------------------------	-----

Anexo 1 – Representação de portas lógicas e eventos para o FTA	126
--	-----

Anexo 2 – Construção da árvore de falhas a partir do método do grupo de corte.....	128
--	-----

Anexo 3 – Exemplos de formação de equipes de FMEA	131
---	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Metodologia de projetos para sistemas modulares.....	5
Figura 2.1 – Combinação da probabilidade de eventos, representado pelo diagrama de Venn...	11
Figura 2.2 – Eventos não-mutuamente exclusivos.	12
Figura 2.3 – Probabilidade condicional com vários eventos.....	13
Figura 2.4 – Evento A dependente de dois eventos mutuamente exclusivos: Bs e Bf.	14
Figura 2.5 – Método da probabilidade condicional.	15
Figura 2.6 – Aplicação do método do grupo de corte ao sistema tipo ponte.	17
Figura 2.7 – Configuração grupo de corte.....	18
Figura 2.8 – Aplicação do método do grupo de ligação ao sistema tipo ponte.	20
Figura 2.9 – Configuração grupo de ligação.	20
Figura 2.10 – Árvore de eventos.....	24
Figura 2.11 – Árvore de eventos reduzida.	26
Figura 2.12 – Árvore de eventos reduzida.	27
Figura 2.13 – Estrutura tipo ponte com numeração de nós.	29
Figura 3.1 – Diagrama de Ishikawa comum.....	35
Figura 3.2 – Diagrama de Ishikawa com os principais fatores que influenciam a quantidade de terra em cana-de-açúcar.	36
Figura 3.3 – Diagrama de Ishikawa secundário.....	36
Figura 3.4 – Nível hierárquico.....	39
Figura 3.5 – Eventos de entrada e saída em uma porta lógica.....	40
Figura 3.6 – Árvore de falhas de um compressor.....	43
Figura 4.1 – Indicativo de que o Modo de falha é uma ação interna e efeito uma ação externa..	51
Figura 4.2 – (1) Índices baseados nas causas. (2) Índices baseados nos modos de falha.	54
Figura 4.3 – Formulário FMECA adaptado da SAE.....	56
Figura 4.4 – Formulário FMEA adaptado da SAE.	60
Figura 4.5 – Análise do tipo <i>Bottom-up</i>	61
Figura 4.6 – Os custos comprometidos ao longo do desenvolvimento do produto.....	63
Figura 4.7 – Relacionamento entre os vários tipos de FMEAs.	64
Figura 4.8 – Categorias de FMEA.	65
Figura 4.9 – Indicativo de que a análise dos modos de falha é uma ação interna ao sistema.....	71

Figura 4.10 – Indicativo de que a pesquisa dos efeitos dos modos de falha é uma ação externa ao sistema.....	71
Figura 5.1 – Bomba de engrenagens (externamente).....	76
Figura 5.2 – Bomba de engrenagens (internamente)	76
Figura 5.3 – FTA para o efeito de topo vibração.....	83
Figura 5.4 – Relação causas, modo de falha e efeitos.....	84
Figura 5.5 – Circuito hidráulico para movimentação de cilindro com duas velocidades.	85
Figura 5.6 – Máquina transplantadora de mudas.....	89
Figura 5.7 – Módulo "colocar muda no solo", desenvolvido por CARRAFA (2001).....	93
Figura 5.8 – Figura esquemática do módulo da transplantadora de mudas.	93
Figura 5.9 – Inclusão de uma placa de polímero para redução das cargas dinâmicas.	102
Figura 5.10 – Sistema hidráulico para controle do leme.....	105
Figura 5.11 – Rede de inferência utilizada para organizar o relacionamento entre as falhas. ...	106
Figura 5.12 – FTA para a válvula direcional.....	107
Figura 6.1 – Causas que tem influência no efeito “Não conduz muda”.	114
Figura 6.2 – Causas que tem influência no efeito “Danifica a muda”.	114
Figura 1(Anexo 2) – Árvore de falhas a partir do sistema obtido pelo grupo de corte.....	128

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Grupos mínimos de corte	17
Quadro 2.2 – Grupos mínimos de ligação	20
Quadro 2.3 – Matriz de conexão inicial da estrutura tipo ponte	29
Quadro 2.4 – Matriz de conexão reduzida	30
Quadro 2.5 - Matriz de conexão final	30
Quadro 2.6 – Matriz M inicial	31
Quadro 2.7 – Matriz M2	31
Quadro 2.8 – Matriz M3	32
Quadro 3.1 – Portas lógicas “E” e “OU”	40
Quadro 3.6 – Representação de eventos.....	41
Quadro 3.11 - Ilustração do uso do símbolo “transferência”	42
Quadro 4.1 – Modo de falha com a abordagem funcional.....	50
Quadro 4.2 – Modo de falha com a abordagem estrutural.....	50
Quadro 4.3 – Probabilidade de ocorrência	55
Quadro 4.4 – Severidade dos efeitos	55
Quadro 4.5 – Índice de detecção das falhas	55
Quadro 4.10 – Procedimentos para o desenvolvimento do FMECA.....	68
Quadro 4.11 - Categorias ou riscos para avaliar a gravidade da falha	72
Quadro 4.12 – Resultados e benefícios obtidos com o FMECA.....	73
Quadro 5.1 – Lista dos componentes e suas funções.....	79
Quadro 5.2 – Os componentes da bomba e seus modos de falhas	80
Quadro 5.3 – Componentes, modos de falha e seus efeitos.....	81
Quadro 5.4 – Componentes, modos de falha e causas.....	82
Quadro 5.5 – Formulário FMEA da bomba de engrenagens e do sistema hidráulico.....	86
Quadro 5.6 – Módulos funcionais da transplantadora de mudas.....	91
Quadro 5.7 – Mudança dos nomes dos componentes.....	94
Quadro 5.8 – Mudanças da descrição das funções dos componentes.....	95
Quadro 5.9 – Componentes da transplantadora de mudas.....	96
Quadro 5.10 – Componentes, modos de falha e efeitos.....	97
Quadro 5.12 – Princípio de solução para as causas dos modos de falha.....	101

Quadro 1 (Anexo 3) – Equipe de um FMEA de sistema:	131
Quadro 2 (Anexo 3) – Equipe de um FMEA de projeto:	131
Quadro 3 (Anexo 3) – Equipe de um FMEA de processo:	131
Quadro 4 (Anexo 3) – Equipe de um FMEA segundo:.....	131

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

APQP: Advanced Product Quality Planning - Planejamento de Qualidade de Produto Avançado.

Cpk: Índice de Capacidade de Processo.

EMC: Engenharia Mecânica.

FMEA: *Failure Mode and Effects Analysis* – Análise do Modo de Falha e seus Efeitos.

FMECA: *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis* – Análise dos Modos de Falhas, Efeitos e Criticalidade.

FTA: *Fault Tree Analysis* – Análise da Árvore de Falhas.

ISO 9000: Normas Internacionais de gestão da qualidade e garantia da qualidade.

ISO: *International Standard Organization*.

LASHIP: Laboratório de Sistemas Hidráulicos & Pneumáticos.

MIL-STD 1629A: Norma para o desenvolvimento do FMECA criada pelo Departamento Norte-Americano de Defesa.

NASA: *National Aeronautics and Space Administration* – Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço.

NeDIP: Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos.

NPR: Número de Prioridade de Risco.

OEM: Original Equipment Manufacturer – “Montadoras”.

QS-9000 *Quality Standard*: Conjunto de normas da qualidade usado pelas empresas automotivas Chrysler, Ford e General Motors.

SAE: *Society of Automotive Engineers*.

UFSC: Universidade Federal de Santa Catarina.

RESUMO

Este trabalho versa sobre algumas ferramentas de análise de falhas, mais especificamente, Análise do Modo de Falha e seus Efeitos (FMEA) e Análise da Árvore de Falhas (FTA) que são as mais utilizadas pelos engenheiros de confiabilidade. Embora seja possível encontrar uma vasta documentação (livros, artigos, *handbooks*), há muita dificuldade na implantação do FMEA e, principalmente, no correlacionamento entre as informações geradas pelo FMEA e FTA na análise e no desenvolvimento do produto.

O objetivo deste trabalho é dissertar sobre o conhecimento acumulado e organizá-lo de forma que possa facilitar a sua utilização nas fases do ciclo de vida do produto: projeto e uso. No primeiro caso, objetiva-se trabalhar ainda na fase de desenvolvimento de produto, quando se tem o conceito do produto definido, ou seja, projeto conceitual, preliminar e detalhado, objetivando eliminar as falhas ainda no projeto. No segundo caso, as ferramentas permitem obter um bom conhecimento do produto que deve ser repassado para os clientes na forma de capacitação e no planejamento da manutenção.

Com o uso dessas ferramentas, é possível dispor-se de informações detalhadas, facilitando o entendimento dos modos de falha e seus efeitos, e verificar o que é possível fazer e o que deve ser feito para garantir pleno funcionamento do produto. Com isso têm-se reflexos nos aspectos vinculados à confiabilidade e manutenibilidade. São apresentados dois estudos de caso relacionados ao uso do FMEA: o primeiro estudo é uma aplicação sobre o projeto de uma transplantadora de mudas na fase do projeto detalhado; e o segundo estudo é outra aplicação sobre um componente de um sistema hidráulico (uma bomba de engrenagens). E um estudo de caso relacionado ao FTA é apresentado com o objetivo de facilitar a comunicação entre o engenheiro do conhecimento e o especialista.

Como conclusão, foi verificado que as dificuldades na aplicação das ferramentas de análise de falhas ocorrem e são naturais. O maior ou menor grau dessas dificuldades varia de acordo com o sistema que está sendo analisado porque as definições não se ajustam a todos os casos.

ABSTRACT

This work presents some failure analysis tools, more specifically, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA), the most used tools by the reliability's engineers. Although there are many references (books, papers, handbooks), it is difficult to introduce FMEA and to correlate the information obtained from FTA with FMEA in the product development and evaluation.

The aim of this work is explain and organize the accumulated knowledge, to make easy the use of tools during product design and use. In the first case, the goal is to work during the product development phase, when the product concepts are defined (conceptual design) and also in the phases of preliminary and detailed design to eliminate the faults during the development phase. In the second case, the tools allow to obtain a good knowledge of the product that should be shared with customers by training and maintenance planning. It is possible to get detailed knowledge by using these tools, making easy the understanding about the failure modes and their effects, and verifying what is possible to do and what must be done to assure the complete operation of the product. These will contemplate the related aspects to reliability and maintainability. Two studies of case related to FMEA are presented: the first study is an application in the design of a seedlings transplant machine and, the second study is an analysis of a hydraulic system component, *i.e.*, a gear pump. Finally, a study of case related to FTA was done, that makes easy the communication between a knowledge engineer and an expert.

In conclusion, it was verified that the difficulties on applications of failure analysis tools occur and they are normal. The degree of these difficulties varies according to the system that is analyzed because the definitions don't adjust to all cases.

Capítulo 1

Introdução

A competitividade e as exigências dos consumidores e de legislação têm feito com que as empresas busquem a melhoria contínua de seus produtos, com redução dos custos e melhora da qualidade, objetivando alcançar a satisfação do cliente. Para garantir produtos com boa qualidade, que atendam as necessidades do cliente, é preciso que se estabeleça um sistema de controle eficiente. Existem vários sistemas que podem ser usados: Simulações numéricas, ensaios (acelerados, destrutivos), revisões, CEP (Controle Estatístico do Processo), e métodos de análise de componentes ou de sistemas.

Segundo SOUZA e POSSAMAI (2000), são necessários investimentos expressivos para obter qualidade e confiabilidade do produto. No entanto, a não qualidade e a não confiabilidade normalmente resultam em custos muito maiores.

Um produto ou serviço de qualidade é aquele que atende perfeitamente, de forma confiável, acessível, segura e no tempo certo às necessidades do cliente (CAMPOS, 1992).

Confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo (DIAS, 1997).

Os sistemas de controle devem ser incorporados nas diferentes fases do desenvolvimento do produto e devem ser utilizados para avaliar vários aspectos do produto: resistência, confiabilidade, manutenibilidade, entre outros.

Mantenabilidade é a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos (DIAS, 1997).

Segundo HAWKINS e WOOLLONS (1996), a confiabilidade vem se estabelecendo como uma parte integrante do processo de projeto de sistemas complexos, em aplicações de alto custo e alto risco. As alterações dos projetos em suas fases iniciais se dão de uma maneira mais simples e flexível. Além disso, a maior parte do custo final do produto é ditada na fase de projeto.

Este trabalho versa sobre algumas ferramentas relacionadas à análise de falhas: a Análise do Modo de Falha e seus Efeitos (FMEA), a Análise da Árvore de Falhas (FTA) e o Diagrama de Ishikawa que visam obter uma maior confiabilidade e manutenibilidade nos produtos.

A capacidade de levantar as possíveis falhas do produto utilizando as ferramentas de análise de falhas, permite interferir no projeto para gerar soluções preventivas. Em decorrência disso, fica estabelecida a própria manutenibilidade do produto, dado que se conhece os mecanismos que levaram às falhas e aos efeitos proporcionados. A síntese dessa aplicação é a melhora da confiabilidade, e por sua vez, da disponibilidade, requisito fundamental para o sucesso do produto.

Através do conhecimento do comportamento das falhas é possível escolher o tipo de manutenção (corretiva, preventiva ou preditiva) mais adequado a cada tipo de falha. Na maioria dos casos, é desejável atuar antes que a falha ocorra, pois, segundo ABDUR-NOUR (1998), o custo de uma falha durante a operação do equipamento é muito maior do que o custo para substituição antecipada do componente.

As ferramentas de análise de falhas podem ser utilizadas nas diferentes fases do projeto. Neste trabalho não são discutidos os aspectos associados à metodologia de projeto de produto. Será assumido como referência, a metodologia de projeto que está sendo estudada e desenvolvida no UFSC/EMC/NeDIP¹ (BACK, 1983; BACK e FORCELLINI, 1998; OGLIARI, 1999; MARIBONDO, 2000; FONSECA, 2000) e nela serão indicadas as possibilidades de uso do FMEA e FTA para auxiliar o projetista a tomar as decisões mais adequadas em cada fase do projeto, objetivando garantir ao produto confiabilidade e manutenibilidade.

1.1 Objetivos e Contribuições

Embora seja possível encontrar uma vasta documentação (livros, artigos, *handbooks*, *internet*), há muita dificuldade na implantação do FMEA. O objetivo deste trabalho é dissertar sobre o conhecimento acumulado e organizá-lo de forma que possa facilitar a sua utilização nos processos da vida do produto: projeto e uso.

No primeiro caso, objetiva-se trabalhar ainda na fase de desenvolvimento de produto, principalmente, quando se tem o conceito do produto definido e nas fases de projeto preliminar e detalhado, objetivando eliminar as falhas no projeto.

¹ UFSC/EMC/NeDIP: Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Mecânica – Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos.

No segundo caso as ferramentas permitem proporcionar bom conhecimento do produto que podem e devem ser repassados para os clientes na forma de programas de capacitação. Com o uso destas ferramentas pode-se dispor de informações detalhadas facilitando o entendimento dos modos de falha, seus efeitos e o que pode e deve ser feito para garantir pleno funcionamento do produto. Com isso têm-se reflexos nos aspectos vinculados a confiabilidade, manutenibilidade e nos processos de manutenção.

Uma aplicação de FMEA é feita sobre uma transplantadora de mudas e também sobre uma bomba de engrenagem. Sendo assim, será feita uma revisão bibliográfica mostrando os pontos de vista de vários autores, cujas obras servirão para estabelecer a base do FMEA. Tendo a base bem estabelecida, a sua aplicação nas diferentes fases do ciclo de vida do produto (projeto preliminar, projeto detalhado, produção...) se tornará mais clara e simples.

O FTA e o diagrama de Ishikawa são ferramentas que trabalham com causas e efeitos de falha, eventos estes que também estão presentes nos formulários FMEA, mas representados de outra maneira. É apresentado um estudo utilizando o FTA, como uma ferramenta para a representação do conhecimento, que facilita o processo de aquisição do conhecimento para definir um sistema especialista. Sendo assim, este documento pretende mostrar como trabalhar de forma integrada com estas três ferramentas.

Os formulários tradicionais são cansativos e pouco didáticos, tornando-se enfadonhos quanto à análise, na discussão de um grupo FMEA. O trabalho em conjunto com outras formas de análise, tem como objetivo tornar o material mais rico e amigável.

Outro ponto importante foi o envolvimento de membros dos grupos de pesquisas (UFSC/EMC/NEDIP e UFSC/EMC/LASHIP²), no sentido de utilizarem essas técnicas de análise nas fases de desenvolvimento do produto e processo de fabricação.

No estudo preliminar efetuado para definir os objetivos, foi constatado que:

- As ferramentas FMEA e FTA são largamente utilizadas pelas equipes de qualidade e confiabilidade. Existe uma razão e deseja-se verificar o porquê de se trabalhar com as duas ferramentas.
- O diagrama de Ishikawa tem em sua estrutura causas e efeitos de falha. Deseja-se verificar se o uso desta ferramenta, junto com o FMEA e FTA, traz benefícios significativos para uma análise de falhas.

² UFSC/EMC/LASHIP: Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Mecânica – Laboratório de Sistemas Hidráulicos & Pneumáticos.

• Espera-se com o desenvolvimento deste trabalho, que o uso das ferramentas (FMEA, FTA e diagrama de Ishikawa) tenha sido facilitado, permitindo que a sua utilização traga os benefícios propostos aos produtos desenvolvidos.

Hipótese: Se houver uma utilização maior destas ferramentas, em aplicações simples, mas tecnicamente bem formuladas, então poderá ocorrer incorporação dessas ações no dia-a-dia de projetistas, analistas, manutenibilistas e professores de projeto de produtos, facilitando e ampliando o uso destas ferramentas.

1.2 Metodologia de projeto para sistemas modulares

As metodologias de projeto são procedimentos sistemáticos que auxiliam o projetista durante o desenvolvimento de produto. A Figura 1.1 apresenta a metodologia de projeto para sistemas modulares com suas principais fases, desenvolvida por MARIBONDO (2000). Vale salientar aqui que, as ferramentas de análise de falhas podem ser aplicadas em metodologias mais gerais, isto é, não precisam ser aplicadas especificamente em metodologias de projetos para sistemas modulares.

A proposição apresentada por MARIBONDO (2000) facilita a utilização das ferramentas de FMEA e FTA em função do grau de detalhamento da metodologia. O autor foi profundo e preciso na sistematização do processo de projeto e nas definições.

A seguir é apresentada, de forma sintetizada, uma descrição das fases do processo de projeto adotado:

Projeto informacional

Entrada: Desejos e necessidades do solicitante do projeto.

- 1 – Pesquisar informações sobre o tema de projeto
- 2 – Definir o problema de projeto
- 3 – Identificar os desejos e as necessidades dos clientes e usuários do sistema modular.
- 4 – Estabelecer os requisitos dos clientes do sistema modular.
- 5 – Estabelecer os requisitos de projeto para o sistema modular.
- 6 – Analisar, caso existam, os sistemas concorrentes.
- 7 – Hierarquizar os requisitos de projeto do sistema modular.
- 8 – Estabelecer as especificações de projeto do sistema modular.

Saída: Especificações de projeto do sistema modular.

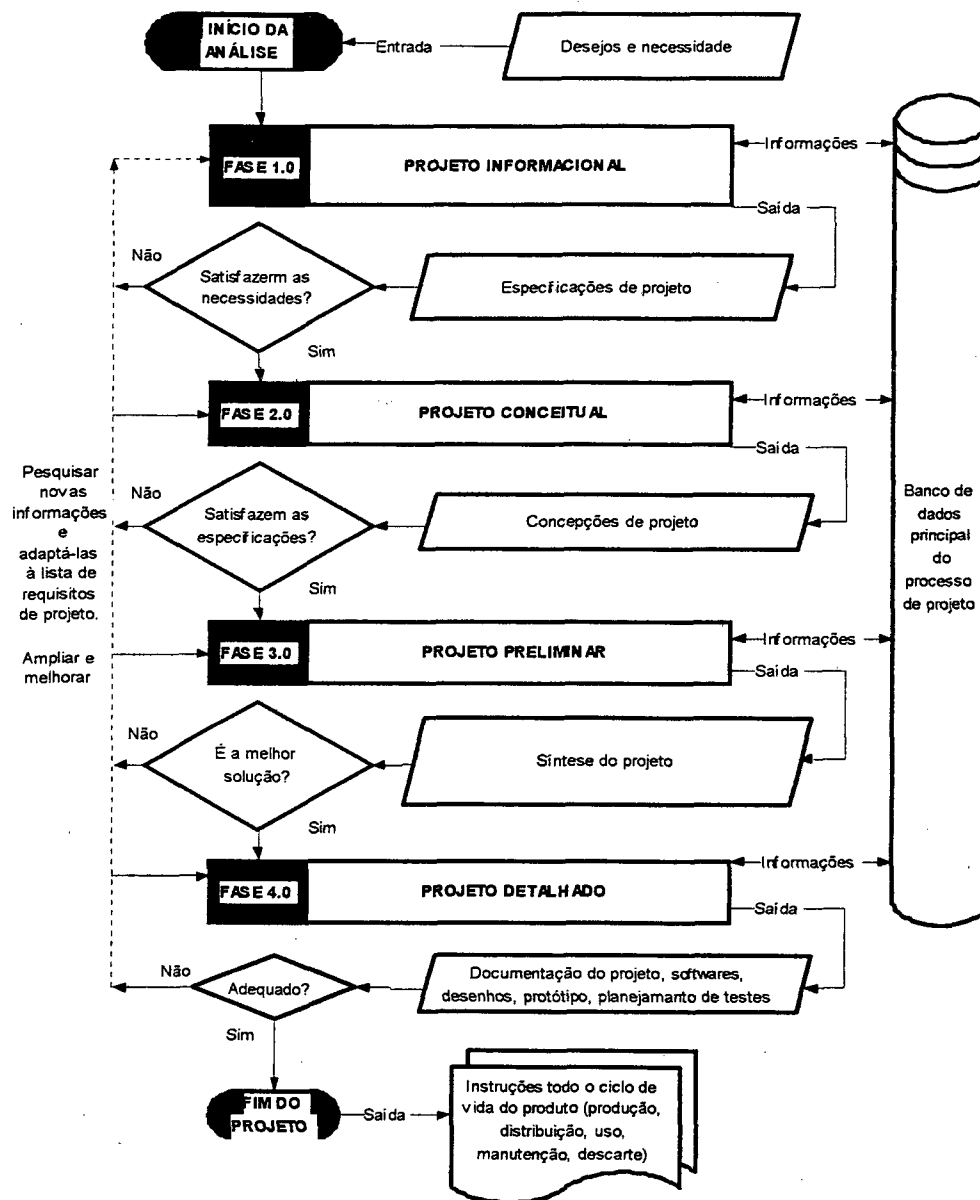


Figura 1.1 - Metodologia de projetos para sistemas modulares (MARIBONDO, 2000).

Projeto Conceitual

Entrada: Especificações de projeto do sistema modular.

- 1 – Estabelecer as estruturas funcionais do sistema modular.
- 2 – Estabelecer os módulos funcionais do sistema modular.
- 3 – Selecionar a estrutura funcional que melhor atende o problema de projeto.
- 4 – Estabelecer os módulos construtivos que melhor atendem o problema de projeto.
- 5 – Estabelecer as concepções de projeto que melhor atendem o problema de projeto.

Saída: Concepções de projeto do sistema modular.

Projeto Preliminar

Entrada: Concepções de projeto do sistema modular.

- 1 – Efetuar dimensionamentos.
- 2 – Selecionar materiais.
- 3 – Estabelecer formas preliminares de fabricação do sistema.
- 4 – Estabelecer formas preliminares de montagem do sistema.
- 5 – Estabelecer formas preliminares de testes do sistema.
- 6 – Estabelecer formas preliminares de transporte do sistema.
- 7 – Estabelecer formas preliminares de manutenção do sistema.
- 8 – Estabelecer formas preliminares de manuseio seguro para utilização do sistema modular.
- 9 – Estabelecer formas preliminares de reuso, reciclagem e disposição final do sistema.
- 10 – Estabelecer formas preliminares do projeto estético do sistema.
- 11 – Adequar o sistema modular às normas.
- 12 – Otimizar o sistema.
- 13 – Calcular os custos preliminares do sistema modular.

Saída: Sistema modular otimizado.

Projeto detalhado do sistema.

Entrada: Sistema modular otimizado.

- 1 – Detalhar o sistema modular.
 - Desenhar os módulos do sistema modular;
 - Desenhar os leiautes das combinações do sistema modular;
 - Detalhar a lista dos componentes do sistema modular;
- 2 – Calcular os custos do sistema modular.
 - Calcular os custos de pesquisa e desenvolvimento do sistema modular;
 - Calcular os custos de fabricação, montagem e testes do sistema modular;
 - Calcular os custos de operação e manutenção do sistema modular;
 - Calcular os custos de retirada e descarte do sistema modular.
- 3 – Revisar o projeto desenvolvido
 - Verificar se o sistema modular atende as especificações de projeto estabelecidas;
 - Verificar se o sistema modular está adequado às fases do ciclo de vida e às normas.

Saída: Sistema modular detalhado.

Os documentos criados durante o desenvolvimento de um projeto são muito importantes para as análises de falhas. Devem ser registradas informações como: funções (dos sistemas, subsistemas e componentes), especificações (projeto, fabricação, material, uso), desenhos, fluxogramas, modelos confiabilísticos, entre outras informações, as quais serão utilizadas na análise das falhas.

Observa-se que o foco voltado para sistema modular, foi do autor da metodologia. As ferramentas FMEA e FTA foram desenvolvidas e adaptadas às necessidades que estão presentes em produtos, projetos, serviços ou sistemas, independente da metodologia de projeto em uso. É nessa visão geral que se pretende estar inserido, na medida que se vai dissertando sobre o tema proposto.

1.3 As ferramentas de análise de falhas

A Análise da Árvore de Falhas (FTA – *Fault Tree Analysis*) é bastante utilizada na área da confiabilidade, junto à Análise do Modo de Falhas e seus Efeitos (FMEA – *Failure Mode and Effects Analysis*). O FMEA é utilizado para uma análise local (*Bottom up*), onde se procura determinar os modos de falha dos componentes, e de que maneira afetam os níveis superiores do sistema (efeitos), e o FTA, ao contrário do FMEA, é usado para uma análise global (*Top down*), onde parte das prováveis falhas do sistema (evento-topo) e chega-se nas falhas dos componentes. Estas ferramentas permitem obter uma série de outras informações como: as causas, o grau de criticalidade da falha, o índice de ocorrência, etc.

O Diagrama de Ishikawa é uma ferramenta de análise de falhas bastante conhecida na indústria devido a sua simplicidade. A ferramenta relaciona as causas que podem influenciar num dado efeito. Todas essas ferramentas podem ser utilizadas para projetos e reprojatos de produtos, processos ou serviços.

Os motivos que levam a estudar as ferramentas de análise de falhas são:

- FMEA é uma ferramenta usada largamente na engenharia de confiabilidade;
- Muitos trabalhos mostram como preencher os campos dos formulários FMEA, mas isto não garante que a ferramenta seja implantada com sucesso;
- A falta de uma descrição mais detalhada nos procedimentos da FMEA e FTA dificulta o uso das ferramentas.

- Há a necessidade de se ter, além do conhecimento da ferramenta, o seu correlacionamento com o processo de projeto. Não está disponível na literatura um documento voltado para o ensino da ferramenta, ou que disserte sobre o processo implementação de maneira detalhada, ou que justifique porque implementar um FMEA ou um FTA.

1.4 Conteúdo dos capítulos

No capítulo 2, serão apresentados vários métodos para a análise da confiabilidade em sistemas. Esses métodos permitem calcular a confiabilidade de sistemas simples, isto é, com configuração série/paralelo, e sistemas que apresentam configuração tipo ponte, chamados de sistemas complexos.

Apesar do FTA permitir calcular a confiabilidade de sistema, ele será apresentado separadamente no capítulo 3. Isto é feito porque ele será uma das ferramentas que junto com o FMEA, formam a estrutura fundamental para análise da confiabilidade em produtos. Com o FTA é possível trabalhar com os modos de falha, associar os eventos através de relações causais, e representar graficamente as relações entre os eventos de falha. Por causa de suas características o FTA e o Diagrama de Ishikawa serão abordados no mesmo capítulo.

No Capítulo 4 será apresentada uma revisão bibliográfica sobre o FMEA, tendo como tópicos o histórico da origem da ferramenta, definições, descrição da equipe responsável pelo desenvolvimento, procedimentos, as aplicações, relacionamentos com outros FMEAs e o respectivo formulário.

O capítulo 5 apresenta dois estudos de caso usando o FMEA e um estudo envolvendo o FTA. Durante os estudos de caso, são descritos aspectos importantes relacionados ao desenvolvimento do FMEA/FTA.

No capítulo 6, apresenta-se as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Métodos para a análise da confiabilidade em sistemas

2.1 Introdução

O objetivo dos métodos de análise de falhas é agregar confiabilidade ao produto. O FMEA/FMECA estão dentro desse contexto, só que o ponto de vista da análise está sempre voltado para o específico, componente ou sistema, objetivando identificar os modos de falha.

Existe uma série de métodos que a partir das probabilidades de falha dos itens, é possível obter a probabilidade de falha do sistema ou a não-confiabilidade do sistema. Para tanto, há que conhecer os relacionamentos entre os componentes, que são responsáveis pela execução da função do sistema. Tendo a probabilidade de falha, pode-se, de outro modo, determinar a confiabilidade, dado que:

$$R + Q = 1 \quad (2.1)$$

onde R representa a confiabilidade do componente ou sistema e Q a não-confiabilidade ou também chamada de probabilidade de falha.

É importante considerar também o nível de relacionamento entre os itens que constituem um sistema. Neste capítulo, serão apresentados os métodos que empregam a teoria da probabilidade de eventos, para o caso de eventos independentes e não mutuamente exclusivos, ou relacionados com o sucesso ou com o fracasso do sistema analisado. Desta forma, inicialmente, será demonstrada a equação que será empregada nos vários métodos para análise de confiabilidade em sistemas.

Os procedimentos geralmente usados para estimar a confiabilidade em sistemas, buscam reduzi-los a um elemento simples equivalente, com confiabilidade igual ao do sistema completo. Existem determinadas configurações de sistemas que não podem ser representadas por combinações em série e paralelo. Nestes casos é preciso elaborar processos que considerem estas exceções no cálculo da confiabilidade, normalmente, denominadas de combinações complexas.

Neste capítulo, apresentam-se as seguintes técnicas:

- Método da Probabilidade Condicional;
- Método do Grupo de Corte;
- Método do Grupo de Ligação;
- Método da Árvore de Eventos;
- Método da Matriz Conexão;
- Método da Eliminação dos nós;

Deve-se observar que se deseja com a apresentação destes métodos, chamar a atenção, principalmente, para a importância condição de independência de um determinado evento. Este fato quando considerado sobre o modo de falha e controle sobre o mesmo, permite, com certeza, projetar produtos mais robustos. Isto porque a preocupação para manter o modo de falha independente, há de considerar que o efeito da falha não pode e não deve afetar os outros componentes.

2.2 Equação para união de eventos independentes e não mutuamente exclusivos

Para dissertar a respeito da teoria de combinação de eventos, serão utilizados os Diagramas de Venn, com o objetivo de facilitar o entendimento das relações entre os conjuntos. O espaço amostral, ou espaço das possibilidades será denotado por S e representa o conjunto de todos os resultados possíveis de ocorrer em um experimento, sujeito às leis do acaso. Qualquer subconjunto de um espaço amostral será um evento, definindo determinado resultado.

A Figura 2.1 representa a combinação de 3 eventos independentes (T_1 , T_2 e T_3), não-mutuamente exclusivos. A probabilidade de ocorrência dos eventos T_1 , T_2 , T_3 , simultaneamente, é gerada pela união dos eventos, processada da seguinte forma:

$$P(T_1 \cup T_2 \cup \dots T_n) = P(T_1 + T_2 + \dots T_n) \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} P(T_1 + T_2 + T_3) = & [P(T_1) + P(T_2) + P(T_3)] \\ & - [P(T_1 \cap T_2) + P(T_2 \cap T_3) + P(T_1 \cap T_3)] \\ & + P(T_1 \cap T_2 \cap T_3) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Generalizando a equação (2.3), tem-se:

$$P(T_1 + \dots + T_n) = \sum_{i=1}^n P(T_i) - \sum_{i \neq j} P(T_i \cap T_j) + \dots + (-1)^{n-1} P(T_1 \cap T_2 \dots \cap T_n) \quad (2.4)$$

sendo: n – número de eventos

$P(T_i)$ – Probabilidade de ocorrência do i -ésimo evento.

O primeiro termo da equação (2.4) representa a probabilidade dos eventos considerando-os isoladamente. O segundo termo corresponde a probabilidade dos eventos combinados dois a dois e assim por diante. Desta forma o último termo representa a combinação de todos os eventos que corresponde a interseção dos “ n ” eventos.

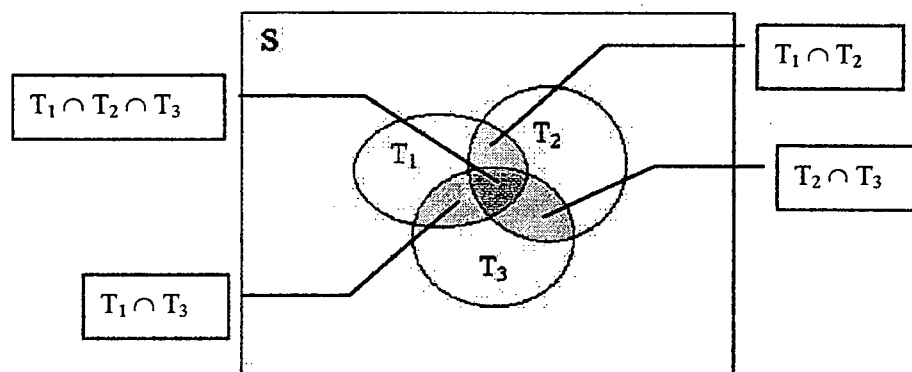


Figura 2.1 – Combinação da probabilidade de eventos, representado pelo diagrama de Venn.

2.3 Método da Probabilidade Condicional

Esta abordagem consiste em reduzir sequencialmente o sistema complexo em subsistemas mais simples com configuração tipo série/paralelo e então recombinar estes subsistemas usando o método da probabilidade condicional.

Inicialmente é necessário que se saiba o que são eventos condicionais. Eventos condicionais são eventos em que a ocorrência de um evento pode ser estimada através de um outro, ou dos outros eventos. Por exemplo, considere dois eventos A e B , deseja-se saber qual a probabilidade de A ocorrer, dado que B tenha ocorrido. Esta análise pode ser descrita matematicamente como $P(A|B)$ no qual a barra vertical é interpretada como DADO e a expressão completa da probabilidade $P(A|B)$ é interpretada como a “probabilidade condicional de A ocorrer DADO que B tenha ocorrido”.

Deve-se tomar cuidado para não confundir “eventos condicionais” com “eventos dependentes”. Eventos dependentes são relacionados por uma ordem cronológica, um

encadeamento, a ocorrência de um leva à ocorrência do outro. Por exemplo, um evento “A” desencadeia um evento “B”. Isto significa que, para que B ocorra é necessária a ocorrência do evento “A”, em um instante anterior. Neste caso, “B” é um evento dependente do evento “A”. Em outras palavras,

- Eventos dependentes: Dado que o evento “A” ocorreu, então **com certeza** o evento “B” vai ocorrer. Então se diz que o evento B é dependente do evento A.
- Eventos independentes¹: Dado que o evento “A” ocorreu, **pode ser** que o evento “B” ocorra ou não.

Na Figura 2.2, existe uma interseção entre os eventos, uma área comum, representando um caso de eventos não-mutuamente exclusivos. Para se ter eventos condicionais, é necessário que haja na representação do diagrama de Venn uma intersecção dos eventos.

“A” e “B” são eventos condicionais, mas isso não significa que a ocorrência de um evento automaticamente resultará na ocorrência do outro. Como existe a interseção, partindo da hipótese de que o evento “B” tenha ocorrido, existe uma probabilidade do evento “A” também ocorrer.

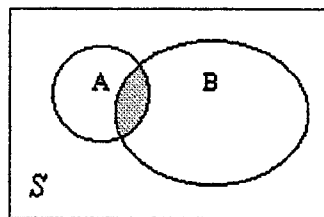


Figura 2.2 – Eventos não-mutuamente exclusivos (BILLINTON e ALLAN, 1987).

O valor da probabilidade do evento A ocorrer, sabendo que o evento B já ocorreu, pode ser deduzido partindo da análise do diagrama de Venn, Figura 2.2. A área escura da Figura 2.2 mostra a ocorrência de A e B (interseção), e é representada matematicamente como $(A \cap B)$, sendo que a probabilidade $P(A|B)$ pode ser escrita como:

$$P(A|B) = \frac{\text{Número de ocorrências em A e B (interseção)}}{\text{Número de ocorrências em B}} \quad (2.5)$$

¹ Dois eventos são **estatisticamente independentes** se a ocorrência de um evento não afeta a probabilidade de ocorrência do outro (DIAS, 1997).

Similarmente, $P(B) = \frac{B}{S}$ e $P(A \cap B) = \frac{(A \cap B)}{S}$

Substituindo tem-se, $P(A|B) = \frac{S \cdot P(A \cap B)}{S \cdot P(B)}$

Simplificando a expressão resulta,

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \tag{2.6}$$

Similarmente para $P(B|A)$ tem-se,

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} \tag{2.7}$$

Na Figura 2.3 tem-se uma generalização da Figura 2.2, onde, vários eventos B_i s, mutuamente exclusivos, estão presentes. O evento A é um evento independente, mas não mutuamente exclusivo em relação aos eventos B_i s, porque faz interseção com todos os eventos B_i s.

Tendo a probabilidade de cada evento B_i e a probabilidade A em relação a cada B_i , é possível determinar a probabilidade do evento A.

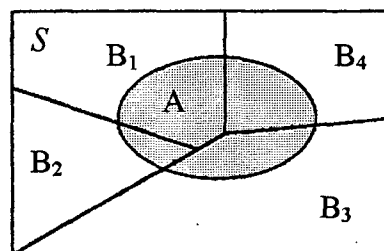


Figura 2.3 – Probabilidade condicional com vários eventos (DIAS, 1997).

Partindo da equação (2.6) e isolando o termo $P(A \cap B)$, pode-se reescrever,

$$P(A \cap B) = P(A|B) \cdot P(B)$$

O seguinte grupo de equações pode ser deduzido para cada B_i

$$P(A \cap B_1) = P(A|B_1) \cdot P(B_1)$$

$$P(A \cap B_2) = P(A|B_2) \cdot P(B_2)$$

.....

$$P(A \cap B_n) = P(A|B_n) \cdot P(B_n)$$

Escrevendo em forma de somatório resulta:

$$\sum_{i=1}^n P(A \cap B_i) = \sum_{i=1}^n P(A|B_i) \cdot P(B_i) \quad (2.8)$$

O relacionamento entre os eventos pode ser visto da Figura 2.3, onde é mostrado que o somatório de todas as interseções de B_i com A , gera o próprio evento A . Logo,

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A|B_i) \cdot P(B_i) \quad (2.9)$$

Se a ocorrência de um evento genérico A for dependente somente de dois eventos mutuamente exclusivos, sucesso (B_s) ou falha (B_f), então a equação 2.9 pode ser escrita como:

$$P(A) = P(A|B_s) \cdot P(B_s) + P(A|B_f) \cdot P(B_f) \quad (2.10)$$

A Figura 2.4 representa a equação (2.10) através do Diagrama de Venn.

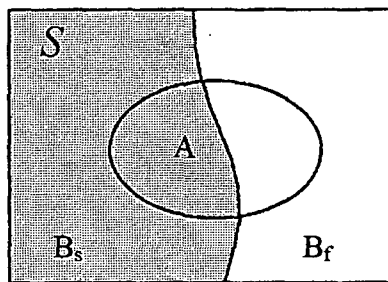


Figura 2.4 – Evento A dependente de dois eventos mutuamente exclusivos: B_s e B_f .

A determinação da probabilidade de sucesso de um evento está associado a confiabilidade daquele evento, enquanto a estimativa da probabilidade de falha ou insucesso está associado à não-confiabilidade. Se o componente A é dependente do componente B , então a análise probabilística do sistema composto por esses dois componentes deve contemplar a ocorrência dos dois eventos possíveis e mutuamente exclusivos, chamado de sucesso ou falha (insucesso). Reescrevendo a equação (2.10) para um sistema dependente de um componente B tem-se:

$$P(\text{sucesso do sistema}) = P(\text{sucesso do sistema dado que } B \text{ é bom}) \cdot P(B_s) + P(\text{sucesso do sistema dado que } B \text{ é ruim}) \cdot P(B_f) \quad (2.11)$$

$$P(\text{falha do sistema}) = P(\text{falha do sistema dado que B é bom}) \cdot P(B_s) + P(\text{falha do sistema dado que B é ruim}) \cdot P(B_f) \tag{2.12}$$

Com o desenvolvimento das equações (2.11) e (2.12) é possível iniciar o estudo do Método da Probabilidade Condicional para fazer a análise de confiabilidade de sistemas. Inicialmente, deve-se selecionar o elemento x_i que será considerado como bom e ruim. Para o cálculo da probabilidade faz-se uso das expressões (2.13) e (2.14), que derivaram das expressões (2.11) e (2.12):

$$P(\text{sucesso do sistema}) = P(\text{sucesso do sistema dado que o componente } x_i \text{ está bom}) \cdot P(x_i \text{ estar bom}) + P(\text{sucesso do sistema dado que o componente } x_i \text{ está ruim}) \cdot P(x_i \text{ estar ruim}) \tag{2.13}$$

$$P(\text{falha do sistema}) = P(\text{falha do sistema dado que o componente } x_i \text{ está bom}) \cdot P(x_i \text{ estar bom}) + P(\text{falha do sistema dado que o componente } x_i \text{ está ruim}) \cdot P(x_i \text{ estar ruim}) \tag{2.14}$$

Em algumas aplicações de engenharia, quer seja nos sistemas de produção, máquinas ou subsistemas, depara-se com soluções cuja relação de redundância é estabelecida por um item que, na condição passiva ou ativa, exerce ação redundante especial. A Figura 2.5, exemplifica uma destas situações.

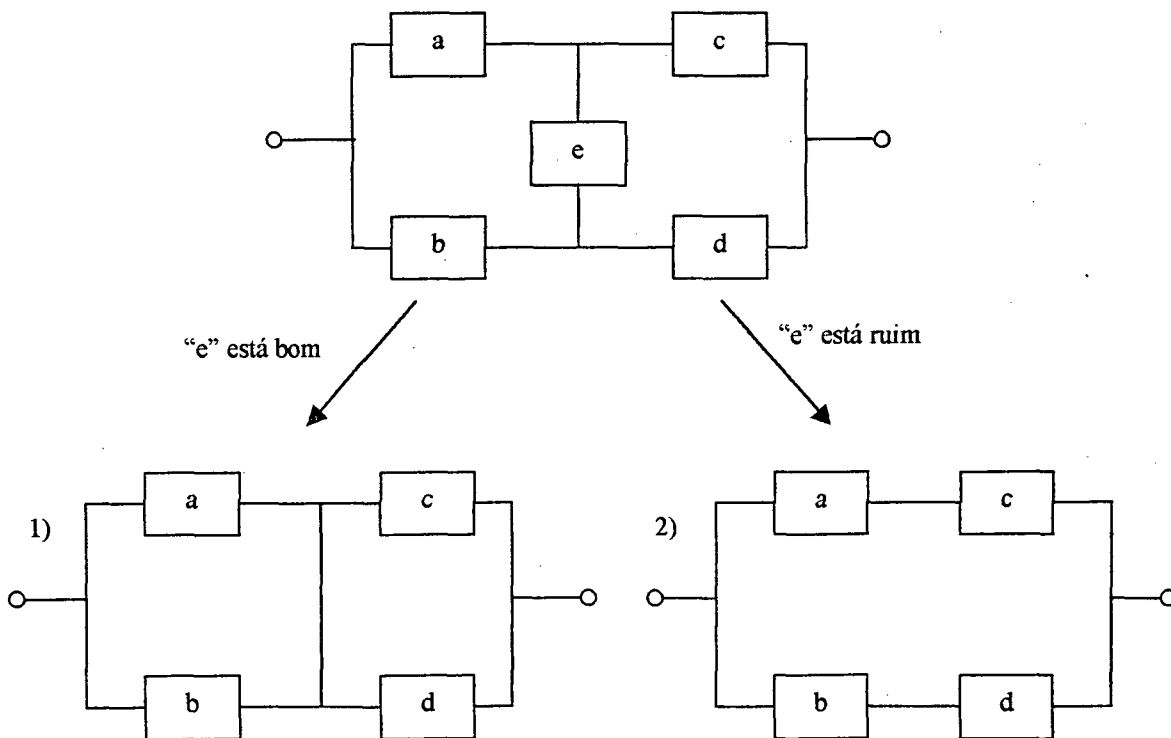


Figura 2.5 – Método da probabilidade condicional (BILLINTON e ALLAN, 1987).

Os dois subsistemas resultantes são mutuamente exclusivos, visto que eles não podem existir simultaneamente, portanto, eles podem ser recombinaados usando o princípio da probabilidade condicional. Este método também é conhecido como Método da Decomposição .

Depois de criar um grupo de subsistemas, no qual todos os subsistemas estão combinados em série e paralelo, os subsistemas podem ser avaliados usando os princípios de sistemas série e paralelo e a confiabilidade global do sistema pode ser avaliada usando a probabilidade condicional.

Neste exemplo, a confiabilidade global do sistema será:

$$R_{st} = R_{s1} \text{ (dado que "e" é bom). } R_e + R_{s2} \text{ (dado que "e" é ruim). } Q_e \quad (2.15)$$

Condição: Dado que "e" é bom

$$R_{s1} = (1-Q_a \cdot Q_b) \cdot (1-Q_c \cdot Q_d) \quad (2.16)$$

Condição: Dado que "e" é ruim

$$R_{s2} = 1 - (1-R_a \cdot R_c) \cdot (1 - R_b \cdot R_d) \quad (2.17)$$

Portanto, a confiabilidade do sistema será:

$$R_{st} = [(1-Q_a \cdot Q_b) \cdot (1-Q_c \cdot Q_d)] \cdot R_e + [1 - (1-R_a \cdot R_c) \cdot (1 - R_b \cdot R_d)] \cdot Q_e \quad (2.18)$$

onde,

R indica a confiabilidade e Q a não-confiabilidade ou a probabilidade acumulada de falha. O índice "st" refere-se ao sistema completo, "s1" e "s2" refere-se ao sistema dado que "e" é bom e dado que "e" é ruim, respectivamente e, finalmente, os índices "a", "b", "c", "d" e "e" associam a confiabilidade ou não-confiabilidade a cada um dos itens que constituem o sistema.

A condicional é uma ferramenta útil para avaliação da confiabilidade e é frequentemente usada em muitas aplicações. Pode-se perceber a dificuldade de programar um código computacional para uma solução geral de redes devido à dificuldade inerente de generalizar a decomposição da rede.

Este método evidencia o grau de importância do item redundante intermediário "e". O ganho de confiabilidade proporcionado pela colocação deste item no sistema pode ser avaliado e confrontado com o investimento feito.

2.4 Método do Grupo de Corte

O método do grupo de corte (*cut set*) identifica os grupos de componentes num sistema, conectados em série, que proporcionam a falha do sistema, se ocorrer falha de um dos grupos do sistema. Na prática evidencia as redundâncias existentes no sistema. Para que um grupo falhe, é necessário que todos os elementos deste grupo falhe, pois todos os elementos do grupo estão conectados em paralelo. Isto pode ser visto na Figura 2.6.

Os componentes de cada grupo são selecionados passando uma linha transversal ao caminho que liga a entrada à saída do sistema. Cada linha que corta transversalmente este caminho da entrada à saída forma um grupo de corte.

Pode-se calcular a probabilidade de falha de cada grupo de corte aplicando o princípio de sistemas em paralelo.

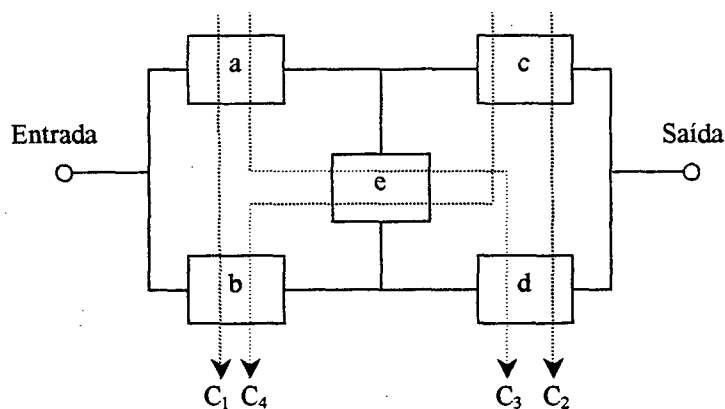


Figura 2.6 – Aplicação do método do grupo de corte ao sistema tipo ponte.

No sistema apresentado na Figura 2.6 foram identificados quatro grupos de corte. Estes grupos estão apresentados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Grupos mínimos de corte (BILLINTON e ALLAN, 1987).

Número do grupo de mínimo corte	Componentes do grupo de corte
1	ab
2	cd
3	aed
4	ceb

O sistema apresentado na Figura 2.6 contém os grupos de corte C₁, C₂, C₃ e C₄ e estes estão conectados em série como pode ser visto na Figura 2.7.

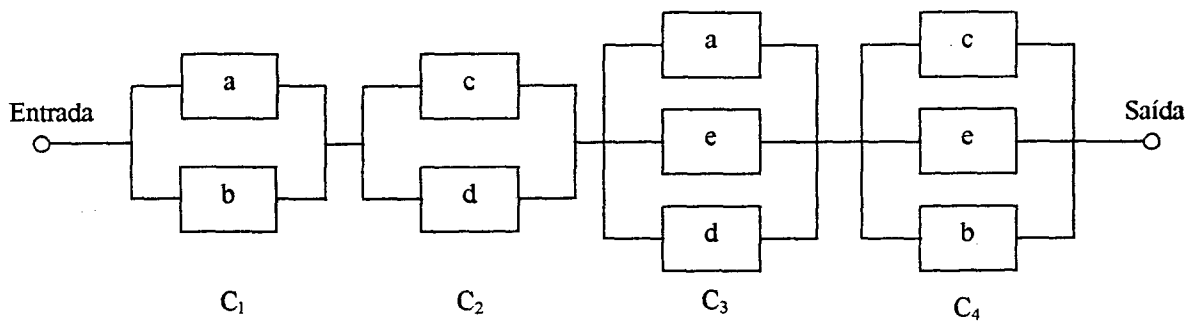


Figura 2.7 – Configuração grupo de corte (BILLINTON e ALLAN, 1987).

Segundo BILLINTON e ALLAN (1987), o método do grupo de corte tem a vantagem de ser facilmente programado. Tem a vantagem de representar a estrutura de funcionamento, numa condição tal que se pode avaliar a confiabilidade de cada grupo de corte, separadamente (DIAS, 1997).

Embora os grupos de corte estejam em série, o conceito de sistema em série não pode ser aplicado porque um mesmo componente pode aparecer em mais de um grupo. Isto mostra que os grupos não são independentes.

Cada grupo de corte é representado por C_i . A falha do sistema ocorre se qualquer C_i falhar. Então a não-confiabilidade de cada grupo é definida por Q_{ci} . A probabilidade de falha do sistema é definida pela união das probabilidades de falha de cada um dos grupos.

$$Q_s = P(Q_{c1} \cup Q_{c2} \cup Q_{c3} \cup Q_{c4}) = P(Q_{c1} + Q_{c2} + Q_{c3} + Q_{c4}) \tag{2.19}$$

Desenvolvendo a equação 2.19 baseado na equação 2.4, tem-se:

$$\begin{aligned} Q_s = & P(Q_{c1}) + P(Q_{c2}) + P(Q_{c3}) + P(Q_{c4}) - P(Q_{c1} \cap Q_{c2}) \\ & - P(Q_{c1} \cap Q_{c3}) - P(Q_{c1} \cap Q_{c4}) - P(Q_{c2} \cap Q_{c3}) - P(Q_{c2} \cap Q_{c4}) \\ & - P(Q_{c3} \cap Q_{c4}) + P(Q_{c1} \cap Q_{c2} \cap Q_{c3}) + P(Q_{c1} \cap Q_{c2} \cap Q_{c4}) \\ & + P(Q_{c1} \cap Q_{c3} \cap Q_{c4}) + P(Q_{c2} \cap Q_{c3} \cap Q_{c4}) \\ & - P(Q_{c1} \cap Q_{c2} \cap Q_{c3} \cap Q_{c4}) \end{aligned} \tag{2.20}$$

onde,

$$P(Q_{c1}) = Q_a \cdot Q_b$$

$$P(Q_{c2}) = Q_c \cdot Q_d$$

$$P(Q_{c3}) = Q_a \cdot Q_e \cdot Q_d$$

$$P(Q_{c4}) = Q_c \cdot Q_e \cdot Q_b$$

$$P(Q_{c1} \cap Q_{c2}) = P(Q_{c1}) \cdot P(Q_{c2}) = Q_a \cdot Q_b \cdot Q_c \cdot Q_d \quad (A \cap B \neq 0, \text{Eventos não-mutuamente exclusivos})$$

$$P(Q_{c1} \cap Q_{c3}) = P(Q_{c1}) \cdot P(Q_{c3}) = Q_a \cdot Q_b \cdot Q_d \cdot Q_e$$

$$P(Q_{c1} \cap Q_{c4}) = P(Q_{c1}) \cdot P(Q_{c4}) = Q_a \cdot Q_b \cdot Q_c \cdot Q_e$$

$$P(Q_{c2} \cap Q_{c3}) = P(Q_{c2}) \cdot P(Q_{c3}) = Q_a \cdot Q_c \cdot Q_d \cdot Q_e$$

$$P(Q_{c2} \cap Q_{c4}) = P(Q_{c2}) \cdot P(Q_{c4}) = Q_b \cdot Q_c \cdot Q_d \cdot Q_e$$

$$P(Q_{c3} \cap Q_{c4}) = P(Q_{c3}) \cdot P(Q_{c4}) = Q_a \cdot Q_b \cdot Q_c \cdot Q_d \cdot Q_e$$

$$\begin{aligned} P(Q_{c1} \cap Q_{c2} \cap Q_{c3}) &= P(Q_{c1} \cap Q_{c2} \cap Q_{c4}) \\ &= P(Q_{c1} \cap Q_{c3} \cap Q_{c4}) \\ &= P(Q_{c2} \cap Q_{c3} \cap Q_{c4}) \\ &= P(Q_{c1} \cap Q_{c2} \cap Q_{c3} \cap Q_{c4}) = Q_a \cdot Q_b \cdot Q_c \cdot Q_d \cdot Q_e \end{aligned}$$

Portanto,

$$\begin{aligned} Q_s &= Q_a \cdot Q_b + Q_c \cdot Q_d + Q_a \cdot Q_d \cdot Q_e + Q_b \cdot Q_c \cdot Q_e - Q_a \cdot Q_b \cdot Q_c \cdot Q_d - Q_a \cdot Q_b \cdot Q_d \cdot Q_e \\ &\quad - Q_a \cdot Q_b \cdot Q_c \cdot Q_e - Q_a \cdot Q_c \cdot Q_d \cdot Q_e - Q_b \cdot Q_c \cdot Q_d \cdot Q_e + 2 \cdot Q_a \cdot Q_b \cdot Q_c \cdot Q_d \cdot Q_e \end{aligned} \quad (2.21)$$

e a confiabilidade é dada por:

$$R_s = 1 - Q_s \quad (2.22)$$

Este método evidencia os laços redundantes. Ao determinar a confiabilidade para cada laço, têm-se identificado os pontos mais robustos do sistema. Pode agora, também ser analisado até a importância funcional de cada laço, aspectos de manutenção, os modos de falha para cada um dos itens, etc.

2.5 Método do Grupo de Ligação

Um grupo de ligação é o caminho mínimo que parte do nó de entrada e percorre o sistema até o nó de saída, para que a função do sistema seja cumprida. Se qualquer um dos itens constituintes do grupo falhar, ocorre a falha do grupo (caminho) porque cada caminho é definido por um sistema série.

O método do grupo de ligação é essencialmente o complemento do método do grupo de corte, e consiste num grupo de ramificações ou simplesmente ramos do sistema conectados desde o nó de entrada ao nó de saída do mesmo, tal que, através de cada ramo ocorra a passagem por um único nó de cada vez (MOJENA, 1999).

Seguindo o exemplo apresentado anteriormente:

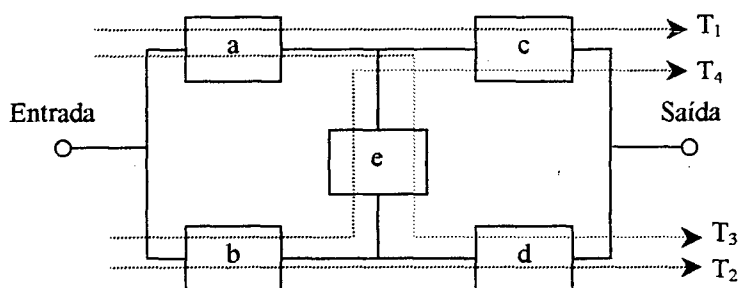


Figura 2.8 – Aplicação do método do grupo de ligação ao sistema tipo ponte.

No sistema apresentado na Figura 2.8 foram identificados quatro grupos de ligação. Estes grupos estão apresentados no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Grupos mínimos de ligação (BILLINTON e ALLAN, 1987).

Número do grupo mínimo de ligação	Componentes do grupo de ligação
1	ac
2	bd
3	aed
4	bec

O sistema apresentado na Figura 2.8 contém os grupos de ligação T₁, T₂, T₃ e T₄ e estes estão conectados em paralelo como pode ser visto na Figura 2.9.

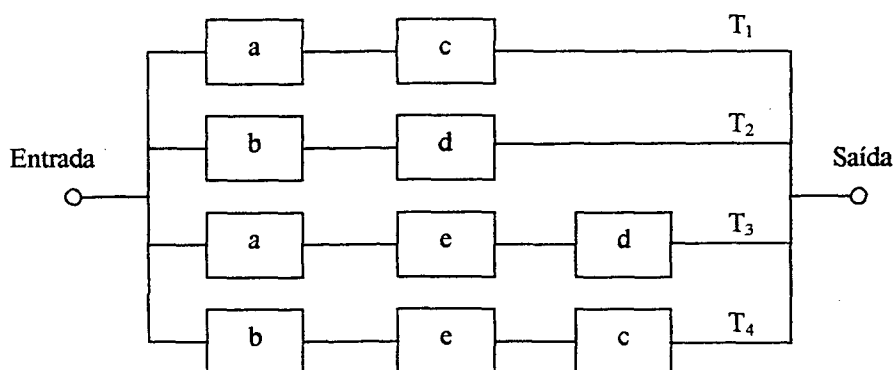


Figura 2.9 – Configuração grupo de ligação (BILLINTON e ALLAN, 1987).

Deve ser notado embora os grupos de ligação estejam em paralelo, o conceito de sistemas em paralelo não pode ser aplicado aqui, porque um mesmo componente pode aparecer em mais de um grupo de ligação. O conceito de união aplica-se aqui, como no grupo de corte, mas agora para calcular a confiabilidade.

Cada grupo de ligação é representado por T_i . Os grupos de ligação estão conectados em paralelo, então a falha do sistema ocorre somente quando todos os grupos T_i falharem. A não-confiabilidade de cada grupo é definida por Q_{T_i} e a confiabilidade R_{T_i} . A confiabilidade do sistema, R_s , é definida pela união das confiabilidades de cada um dos grupos.

$$R_s = P(R_{T1} \cup R_{T2} \cup R_{T3} \cup R_{T4}) = P(R_{T1} + R_{T2} + R_{T3} + R_{T4}) \quad (2.23)$$

Desenvolvendo a equação (2.23) baseado na equação 2.4, tem-se:

$$\begin{aligned} R_s = & P(R_{T1}) + P(R_{T2}) + P(R_{T3}) + P(R_{T4}) - P(R_{T1} \cap R_{T2}) \\ & - P(R_{T1} \cap R_{T3}) - P(R_{T1} \cap R_{T4}) - P(R_{T2} \cap R_{T3}) - P(R_{T2} \cap R_{T4}) \\ & - P(R_{T3} \cap R_{T4}) + P(R_{T1} \cap R_{T2} \cap R_{T3}) + P(R_{T1} \cap R_{T2} \cap R_{T4}) \\ & + P(R_{T1} \cap R_{T3} \cap R_{T4}) + P(R_{T2} \cap R_{T3} \cap R_{T4}) \\ & - P(R_{T1} \cap R_{T2} \cap R_{T3} \cap R_{T4}) \end{aligned} \quad (2.24)$$

onde,

$$P(R_{T1}) = R_a \cdot R_c$$

$$P(R_{T2}) = R_b \cdot R_d$$

$$P(R_{T3}) = R_a \cdot R_e \cdot R_d$$

$$P(R_{T4}) = R_b \cdot R_e \cdot R_c$$

$$P(R_{T1} \cap R_{T2}) = P(R_{T1}) \cdot P(R_{T2}) = R_a \cdot R_b \cdot R_c \cdot R_d$$

$$P(R_{T1} \cap R_{T3}) = P(R_{T1}) \cdot P(R_{T3}) = R_a \cdot R_c \cdot R_d \cdot R_e$$

$$P(R_{T1} \cap R_{T4}) = P(R_{T1}) \cdot P(R_{T4}) = R_a \cdot R_b \cdot R_c \cdot R_e$$

$$P(R_{T2} \cap R_{T3}) = P(R_{T2}) \cdot P(R_{T3}) = R_a \cdot R_b \cdot R_d \cdot R_e$$

$$P(R_{T2} \cap R_{T4}) = P(R_{T2}) \cdot P(R_{T4}) = R_b \cdot R_c \cdot R_d \cdot R_e$$

$$P(R_{T3} \cap R_{T4}) = P(R_{T3}) \cdot P(R_{T4}) = R_a \cdot R_b \cdot R_c \cdot R_d \cdot R_e$$

$$P(R_{T1} \cap R_{T2} \cap R_{T3}) = P(R_{T1} \cap R_{T2} \cap R_{T4})$$

$$= P(R_{T1} \cap R_{T3} \cap R_{T4})$$

$$= P(R_{T2} \cap R_{T3} \cap R_{T4})$$

$$= P(R_{T1} \cap R_{T2} \cap R_{T3} \cap R_{T4}) = R_a \cdot R_b \cdot R_c \cdot R_d \cdot R_e$$

Portanto,

$$R_s = R_a \cdot R_c + R_b \cdot R_d + R_a \cdot R_e \cdot R_d + R_b \cdot R_c \cdot R_c - R_a \cdot R_b \cdot R_c \cdot R_d - R_a \cdot R_c \cdot R_d \cdot R_e - R_a \cdot R_b \cdot R_c \cdot R_e - R_a \cdot R_b \cdot R_d \cdot R_e - R_b \cdot R_c \cdot R_d \cdot R_e + 2 \cdot R_a \cdot R_b \cdot R_c \cdot R_d \cdot R_e \quad (2.25)$$

e a não-confiabilidade é dada por:

$$Q_s = 1 - R_s \quad (2.26)$$

Dado que se tem cada um dos itens na configuração série, é possível estudar o relacionamento entre os itens, avaliando inclusive a influência de cada modo de falha sobre cada uma das ramificações (séries) presentes no sistema. Desde que se tenha conhecimento destes modos de falha, pode-se utilizar o Teorema de Bayes para saber: qual a probabilidade de “c” ter falhado dado que tal modo de falha estava presente em “a”, se considerar o grupo de ligação T_1 . Estas considerações poderiam ser feitas para cada uma das ramificações T_i identificadas.

2.6 Árvore de Eventos

Segundo BILLINTON e ALLAN (1987), uma árvore de eventos é uma representação ilustrada de todos os eventos que podem ocorrer em um sistema. Os sistemas que operam no estado de reserva passiva, geralmente, estão associados com sistemas de segurança. Na prática, o método da árvore de eventos é mais amplamente usado para sistemas de segurança, no entanto, como em outras técnicas comprova ser mais viável para sistemas que operam continuamente.

O método pode ser utilizado em sistema com componentes operando continuamente, onde a ocorrência dos eventos pode ser considerada em ordem arbitrária, ou em sistemas que envolvem componentes no estado de reserva passiva (stand-by), onde deve ser considerada a ocorrência dos eventos em uma seqüência lógica, ou seja, cronologicamente (MOJENA, 1999).

Para ilustrar a aplicação da árvore de eventos para sistemas operados continuamente, será utilizado o sistema da Figura 2.5, configuração tipo ponte.

Cada componente está sujeito a dois eventos, sucesso ou falha. A linha superior que sai de cada componente significa sucesso e a linha inferior falha. Inicialmente, para sistemas com componentes operando continuamente os eventos podem ser considerados em qualquer ordem, porque um componente não opera cronologicamente em relação a outro. Será considerado então os componentes na seguinte ordem: a, b, c, d, e. A árvore de eventos para o sistema tipo ponte

pode ser vista na Figura 2.10. Visto que cada componente pode assumir dois estados, sucesso ou falha, o número total de eventos possíveis para a árvore de eventos é 2^n , onde n é o número de componentes, como existem 5 componentes então existirão 32 possibilidades.

A probabilidade de ocorrência de cada ramificação é obtida a partir do produto das probabilidades dos eventos ao longo desta. Após ter montado a árvore de eventos é preciso obter o resultado, sucesso ou falha, de cada ramificação. Isto é feito a partir dos requisitos de operação do sistema.

Visto que todas as ramificações são mutuamente exclusivas, a probabilidade de sucesso total é calculada somando todos os eventos de sucesso, equação (2.27). O mesmo procedimento pode ser executado para o cálculo da probabilidade de falha, ou pode-se calcular fazendo como complemento do evento de sucesso, isto é, $(1-R_s)$.

A equação da confiabilidade para o sistema, Figura 2.6, pode ser escrita como:

$$R_s = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_9 + P_{10} + P_{11} + P_{12} + P_{13} + P_{17} + P_{18} + P_{19} + P_{21} + P_{22} \tag{2.27}$$

sendo P_i = probabilidade de ocorrência da ramificação i .

e $P_1 = R_a.R_b.R_c.R_d.R_e$

$P_2 = R_a.R_b.R_c.R_d.Q_e$

.....

$P_{22} = Q_a.R_b.Q_c.R_d.Q_e$

Similarmente a probabilidade de falha do sistema é dada por:

$$R_s = P_7 + P_8 + P_{14} + P_{15} + P_{16} + P_{20} + P_{23} + P_{24} + P_{25} + P_{26} + P_{27} + P_{28} + P_{29} + P_{30} + P_{31} + P_{32} \tag{2.28}$$

e

$$R_s + Q_s = 1 \tag{2.29}$$

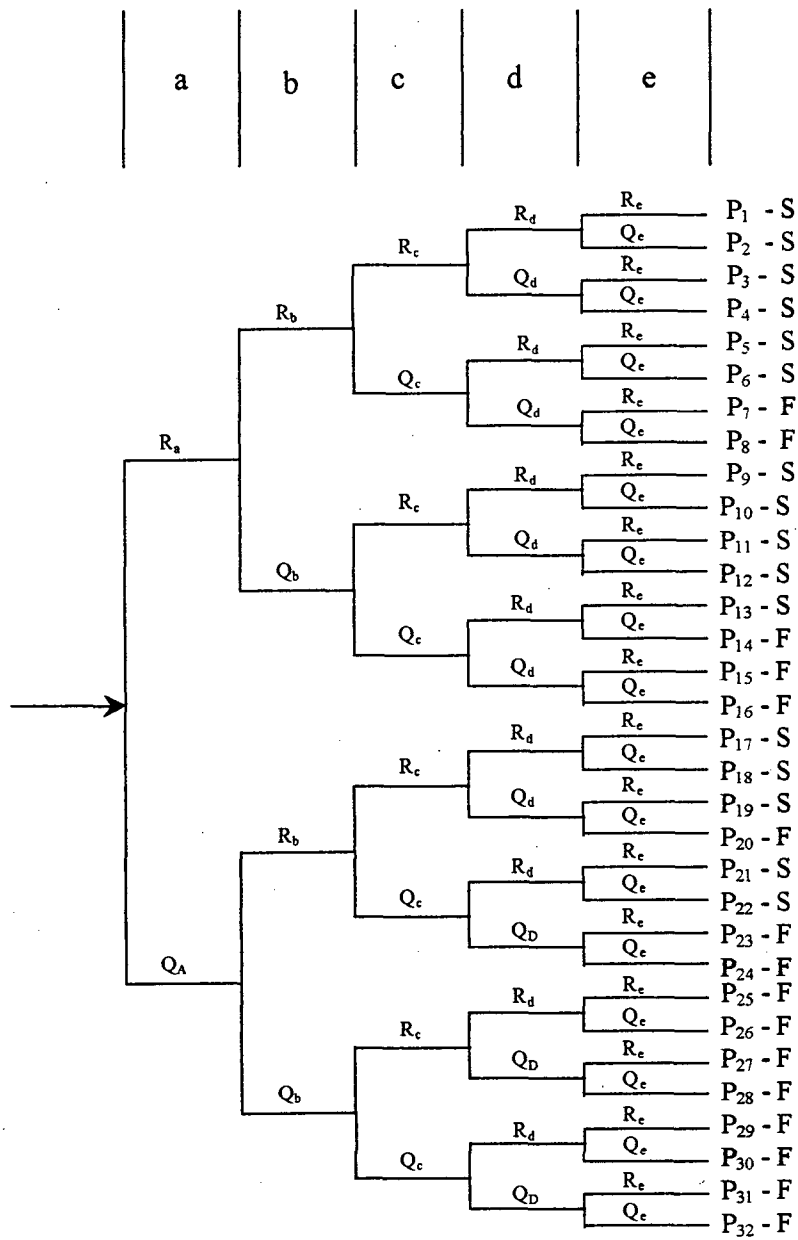


Figura 2.10 – Árvore de eventos (BILLINTON e ALLAN, 1987).

Árvore de eventos reduzida

O número de caminhos possíveis, considerando apenas as condições de sucesso (S) e falha (F) são definidos por 2^n , onde n é o número de itens no sistema. Se considerar eventos intermediários, parcialmente em falha ou parcialmente em operação, o número de eventos cresce enormemente. Uma forma de amenizar este efeito é considerar a árvore de eventos reduzida.

A construção da árvore de eventos reduzida deve ser feita como na árvore de eventos completa, considerando cada evento ou componente de cada vez. No entanto, ao invés de construir a árvore de eventos completa, e depois verificar se o resultado da ramificação foi sucesso ou falha, a verificação é feita antes que cada componente ou evento seja considerado. Pois, a partir do momento que se sabe que a falha de um dado componente causará a falha do sistema, independente do estado dos outros componentes subseqüentes, então não há razão para continuar prosseguindo com a análise ao longo da ramificação. Da mesma maneira, é possível concluir que o sucesso de um dado componente resultará no sucesso do sistema, independente dos outros componentes subseqüentes, o desdobramento da ramificação deve parar neste ponto.

Por exemplo, observando novamente o sistema com configuração tipo ponte, Figura 2.5, é possível concluir que se os componentes “a”, “b” e “c” têm sucesso, o resultado do sistema será sucesso, independente das condições de “e” e “d”. Conseqüentemente, a ramificação denotada por R_a , R_b e R_c não precisa ser desenvolvida mais adiante, porque se sabe que o sistema terá sucesso se estas condições ocorrerem. Da mesma maneira, ao se considerar as falhas dos componentes “a” e “b” provoca a falha do sistema, independente das condições de “c”, “d” e “e”, então não é mais preciso dar continuidade com o desenvolvimento desta ramificação.

Usando esta análise, o número de ramificações que antes era 32 pode ser reduzido para 13, como pode ser observado na Figura 2.11.

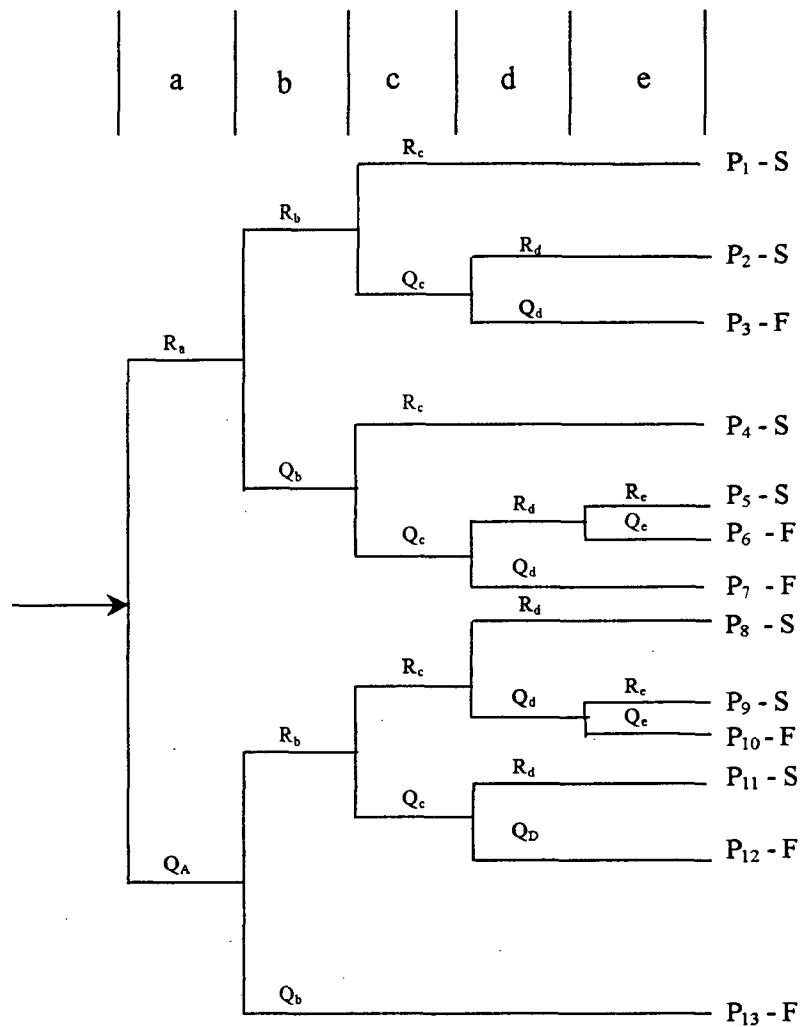


Figura 2.11 – Árvore de eventos reduzida (BILLINTON e ALLAN, 1987).

A confiabilidade para esta configuração pode ser calculada como:

$$R_s = P_1 + P_2 + P_4 + P_5 + P_8 + P_9 + P_{11} \tag{2.30}$$

P_i = Probabilidade de ocorrência da ramificação i .

A probabilidade resultante de cada ramificação é calculada através do produto dos eventos constituintes da ramificação. Então, $P_1 = R_a.R_b.R_c$, $P_2 = R_a.R_b.Q_c.R_d$ e assim por diante. Da mesma maneira, a probabilidade de falha pode ser calculada como:

$$Q_s = P_3 + P_6 + P_7 + P_{10} + P_{12} + P_{13} \tag{2.31}$$

Uma maior redução no tamanho da árvore de eventos pode ser obtida, se for escolhido apenas um tipo de resultado (sucesso ou falha), e desconsiderar aquelas ramificações que conduzem a outros resultados. Por exemplo, se é desejado obter os resultados para o qual o sistema falha, então a árvore de eventos toma a seguinte configuração apresentada pela Figura 2.12. Segundo BILLINTON e ALLAN (1987) esta redução adicional não tem vantagens significativas se for calculada manualmente, mas apresenta grandes vantagens se os eventos e as ramificações forem armazenadas em um computador.

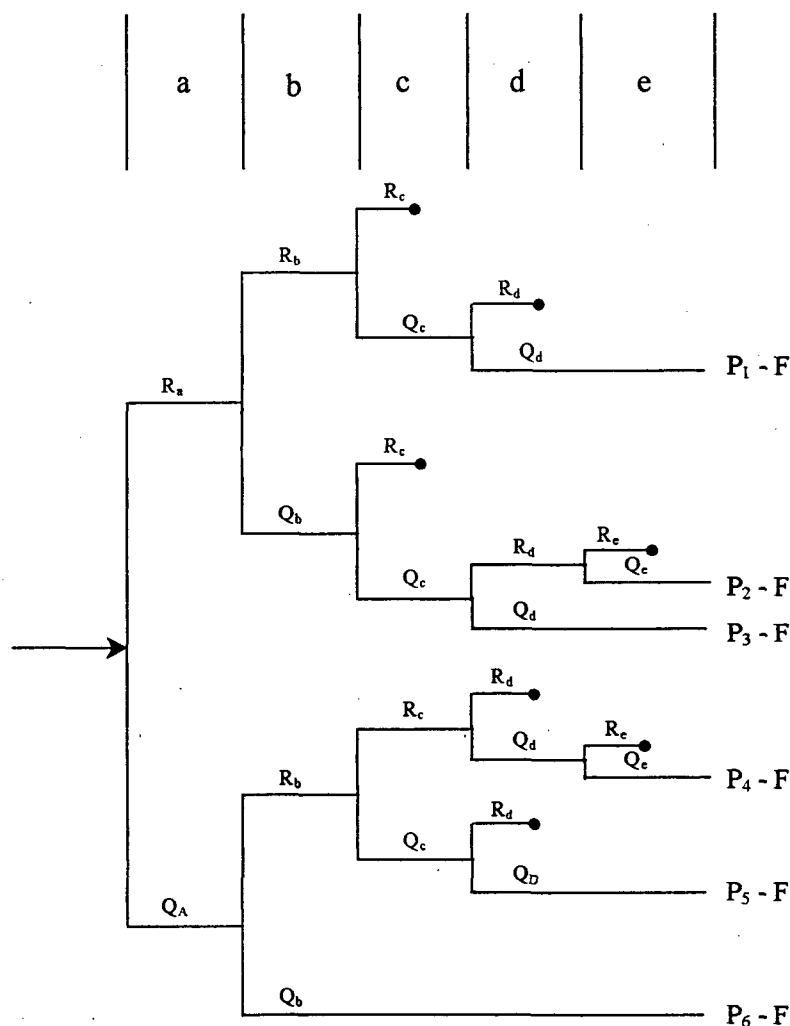


Figura 2.12 – Árvore de eventos reduzida (BILLINTON e ALLAN, 1987).

No caso de sistemas com mais de dois resultados possíveis, este método pode ser adaptado eliminando aqueles caminhos que conduzem apenas a um tipo de resultado do sistema, preferencialmente aqueles os quais conduzirão ao maior número de ramificações. Deste modo a

probabilidade de ocorrência de cada resultado pode ser avaliada diretamente das probabilidades das ramificações da árvore de eventos ou pelos valores complementares destas probabilidades.

O trabalho de verificação dos componentes, no desenvolvimento da árvore de eventos reduzida, pode ser muito facilitado aplicando-se como etapa anterior os métodos de grupo de corte e grupo de ligação. Se for desejada uma árvore de eventos que apresentasse somente os eventos que conduzem a falha do sistema, seria usado o método do grupo de corte, porque ele apresenta os componentes que quando falham juntos, causam a falha do sistema. Caso contrário, se o interesse fosse numa árvore de eventos que apresentasse somente os eventos que conduzem ao sucesso do sistema, seria usado o método do grupo de ligação, porque este apresenta os grupos de componentes que devem estar em funcionamento juntos para garantir que o sistema estará em sucesso.

A seguir, algumas considerações a serem feitas sobre a árvore de eventos:

- Ter conhecimento do modelo físico.
- Ter conhecimento da função de cada item e das conseqüências do sucesso ou insucesso de cada item.
- Excelente para fazer a avaliação de sistemas e utilizar inclusive como treinamento.
- É um método que pode tornar-se tedioso, dado a quantidade de saídas possíveis. Pode por isso ficar muito complexo. Não é viável fazer um detalhamento profundo face ao crescimento exponencial das possibilidades.
- Quando se dispõe de mais de dois eventos possíveis, também se corre o risco de sobrecarregar em informações.
- Os eventos devem ser bem definidos, independentes e mutuamente exclusivos.

2.7 Método da Matriz Conexão

A técnica da matriz conexão envolve a construção da matriz M para o sistema analisado e depois a aplicação do Método da eliminação dos nós ou o Método da multiplicação da matriz para obter a confiabilidade da entrada até a saída.

As linhas e as colunas da matriz M são nós ou pontos de conexão dos componentes do sistema, e os elementos da matriz são os próprios componentes posicionados entre os nós. Os elementos da matriz que são zero indicam que não há componentes entre os nós especificados, e os elementos que são unitários indicam o próprio nó, que acabam sendo os elementos da diagonal principal.

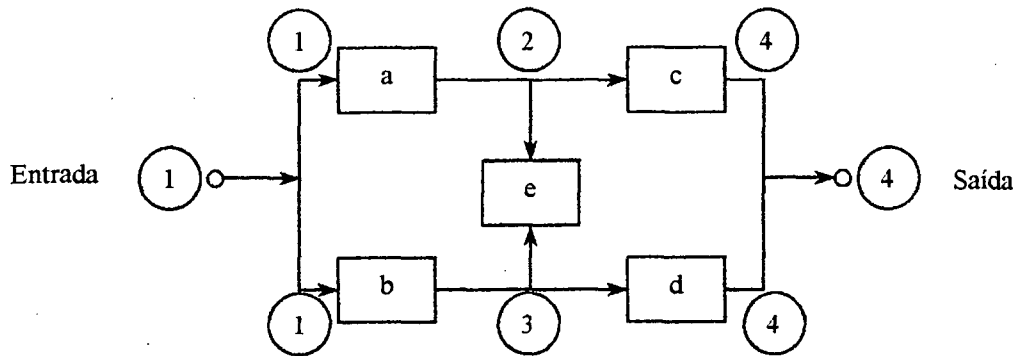


Figura 2.13 – Estrutura tipo ponte com numeração de nós (BILLINTON e ALLAN, 1987).

Quadro 2.3 – Matriz de conexão inicial da estrutura tipo ponte (BILLINTON e ALLAN, 1987).

		Para o nó			
		coluna linha	(1)	(2)	(3)
Matriz (M) =	Do nó (1)	1	a	b	0
	(2)	0	1	e	c
	(3)	0	e	1	d
	(4)	0	0	0	1

Para obter a trajetória desde o nó de entrada até o da saída, sendo que o fluxo de eventos ocorre numa única direção, podem ser empregados dois métodos:

- 1 – Método da eliminação de nós;
Analisa a trajetória entre dois nós de interesse.
- 2 – Método da multiplicação da matriz;
Analisa todos os nós de forma simultânea.

2.7.1 Método da eliminação de nós

Neste método todos os nós da rede, Quadro 2.3, exceto os nós de entrada e saída, são removidos através de uma redução sequencial da matriz de conexão inicial até que a rede seja reduzida a uma matriz 2x2. Neste exemplo, a matriz deve ser reduzida a uma matriz contendo somente o nó 1 e 4 (BILLINTON e ALLAN, 1987). O método faz uso da equação (2.32), no qual as operações de adição e multiplicação fazem uso da álgebra Booleana. Para remover o nó k da matriz, deve-se substituir cada elemento N_{ij} ($i, j \neq k$) por um novo elemento, N^o_{ij} .

$$N^o_{ij} = N_{ij} + (N_{ik} \cdot N_{kj}) \tag{2.32}$$

O novo elemento N°_{ij} substitui o antigo elemento N_{ij} .

$$N^{\circ}_{11} = N_{11} + N_{12}.N_{21} = 1 + a.0 = 1$$

$$N^{\circ}_{13} = N_{13} + N_{12}.N_{23} = b + a.e = b + ae$$

$$N^{\circ}_{14} = N_{14} + N_{12}.N_{24} = 0 + a.c = ac$$

$$N^{\circ}_{31} = N_{31} + N_{32}.N_{21} = 1 + e.0 = 1$$

$$N^{\circ}_{33} = N_{33} + N_{32}.N_{23} = 1 + e.e = 1$$

$$N^{\circ}_{34} = N_{34} + N_{32}.N_{24} = d + e.c = d + ec$$

$$N^{\circ}_{41} = N_{41} + N_{42}.N_{21} = 0 + 0.0 = 0$$

$$N^{\circ}_{43} = N_{43} + N_{42}.N_{23} = 0 + 0.e = 0$$

$$N^{\circ}_{44} = N_{44} + N_{42}.N_{24} = 1 + 0.c = 1$$

Os cálculos resultam na seguinte matriz reduzida,

Quadro 2.4 – Matriz de conexão reduzida (BILLINTON e ALLAN, 1987).

Matriz (M) =

		Para o nó		
		coluna linha	(1)	(3)
Do nó	(1)	1	b + ae	ac
	(3)	0	1	d + ec
	(4)	0	0	1

Realizando os cálculos novamente para remover o nó 3, obtém-se os seguintes elementos:

$$N^{\circ}_{11} = N_{11} + N_{13}.N_{31} = 1 + (b + a.e).0 = 1$$

$$N^{\circ}_{14} = N_{14} + N_{13}.N_{34} = (a.c) + (b + a.e).(d + e.c) = ac + bd + bec + aed$$

$$N^{\circ}_{41} = N_{41} + N_{43}.N_{31} = 0 + 0.0 = 0$$

$$N^{\circ}_{44} = N_{44} + N_{43}.N_{34} = 1 + 0.c = 1$$

A matriz de conexão final fica, então, relacionada somente com o nó de entrada 1 e o nó de saída 4.

Quadro 2.5 - Matriz de conexão final (BILLINTON e ALLAN, 1987).

Matriz (M) =

		Para o nó	
		coluna linha	(1)
Do nó	(1)	1	ac + bd + bec + aed
	(4)	0	1

O elemento (1,4) da matriz reduzida está relacionado diretamente com os caminhos de sucesso que apresenta a estrutura. Associando estes caminhos a eventos ($T_1 = a.c$, $T_2 = b.d$, $T_3 = b.e.c$, $T_4 = a.e.d$), e aplicando as propriedades de probabilidade de união de n eventos independentes, pode-se estimar a confiabilidade do sistema (R_s):

$$R_s = P(R_{T_1} \cup R_{T_2} \cup R_{T_3} \cup R_{T_4}) = P(R_{T_1} + R_{T_2} + R_{T_3} + R_{T_4}) \quad (2.33)$$

A equação (2.33) é mesma que a equação (2.23) e segue o mesmo procedimento, união de eventos independentes não-mutuamente exclusivos.

Os eventos ($T_1 = a.c$, $T_2 = b.d$, $T_3 = b.e.c$, $T_4 = a.e.d$) representam todos os possíveis caminhos que ligam a entrada à saída do sistema, sendo então equivalente ao método do grupo de ligação.

2.7.2 Método da multiplicação da matriz

Neste método a matriz de conexão inicial é multiplicada por si mesmo até o resultado da matriz permanecer inalterado.

Quadro 2.6 – Matriz M inicial (BILLINTON e ALLAN, 1987).

Matriz (M) =

linha \ coluna	(1)	(2)	(3)	(4)
(1)	1	a	b	0
(2)	0	1	e	c
(3)	0	e	1	d
(4)	0	0	0	1

Quadro 2.7 – Matriz M2 (BILLINTON e ALLAN, 1987).

Matriz (M^2) =

linha \ coluna	(1)	(2)	(3)	(4)
(1)	1	a + be	b + ae	ac + bd
(2)	0	1	e	c + de
(3)	0	e	1	ec + d
(4)	0	0	0	1

Quadro 2.8 – Matriz M3 (BILLINTON e ALLAN, 1987).

coluna linha	(1)	(2)	(3)	(4)
(1)	1	a + be	b + ae	ac + bd + bec + aed
(2)	0	1	e	c + de
(3)	0	e	1	ec + d
(4)	0	0	0	1

Caso a matriz M fosse multiplicada mais uma vez o resultado seria o mesmo, então o processo deve parar neste ponto.

É possível perceber que o elemento (1,4) da matriz (M^3) é o mesmo obtido pelo método da eliminação dos nós e também pelo método do grupo de ligação, conseqüentemente, o cálculo da confiabilidade também é feito com o uso da equação 2.33, lembrando que os eventos T_i são independentes e não-mutuamente exclusivos.

A vantagem do método da multiplicação da matriz é que ele fornece todos os grupos de ligação entre todos os pares de nós simultaneamente enquanto que o método da eliminação dos nós fornece somente em relação aos nós de interesse.

2.8 Comentários

O objetivo deste capítulo foi apresentar diferentes maneiras de analisar sistemas, cujos arranjos entre os componentes não se enquadram em sistemas série ou paralelo. Viu-se que os métodos atingem o mesmo objetivo: determinar a confiabilidade ou não-confiabilidade do sistema.

Há que observar também que os métodos são amplamente conhecidos, e das bibliografias existentes (SMITH, 1993; RAMAKUMAR, 1993; O'CONNOR, 1985; LEWIS, 1987), os aqui referenciados trazem o assunto de forma mais didática.

Ao estudar os métodos de cálculo de confiabilidade de sistemas, percebeu-se que todas as referências citadas neste capítulo, tratam o problema simplesmente para a condição do item estar “bom” ou “ruim”, em “falha” ou “operando”. Ocorre que na prática cada modo de falha gera um efeito e, de preferência, não devem se transformar num modo de falha num outro item.

A tomada de consciência do relacionamento entre os modos de falha e seus efeitos, nos sistemas, somente é possível se for identificado em cada item os modos de falhas mais prováveis de acontecer. A partir daí pode-se gerar várias árvores de falha (ou árvores em função de determinados modos de falha) para estudar as relações mais críticas, em termos de confiabilidade.

Evidentemente, a implementação de um processo desses requer dispor de um banco de dados que esteja organizado para fornecer a taxa de falha associada ao modo de falha. Isso permitirá não somente calcular a confiabilidade do sistema por modo de falha, reprojeter partes do sistema para diminuir a probabilidade de ocorrência de determinados modos de falha, como também, planejar os processos de manutenção.

Entendeu-se durante este estudo que era necessário obter informações relativas ao modo das falhas e seus efeitos e que por isso, era necessário aprofundar o estudo do FMEA, o que será feito no capítulo 4.

Deve-se ressaltar que os métodos aqui apresentados, utilizados a partir da fase do projeto conceitual, quando já se dispõe de informações para montar os relacionamentos entre os itens. A sistematização do modelo confiabilístico, ou seja, da montagem em relações série, paralelo ou complexa, é feita a partir do conhecimento do modelo físico e da definição da função. Para isso, estudou-se o diagrama de Ishikawa e o Método da Análise da Árvore de Falhas (FTA – *Fault Tree Analysis*), que serão apresentadas no capítulo 3.

Capítulo 3

Método da Análise da Árvore de Falhas (FTA) e o Diagrama de Ishikawa

3.1 Introdução

Este capítulo trata a respeito do Diagrama de Ishikawa e do Método de Análise da Árvore de Falhas. Ambos os métodos tratam de causas e efeitos de falha, no entanto, com o Diagrama de Ishikawa não é necessário que se tenha tanto conhecimento do sistema em estudo quanto no Método da Árvore de falhas.

No trabalho apresentado por DEGUCHI *et al.* (1999) o diagrama de Ishikawa e o FTA são utilizados para um projeto de melhoramento de uma bomba d'água. O diagrama de Ishikawa fornece uma visão global, no levantamento das causas que podem influenciar na eficiência da bomba e o FTA é utilizado em uma análise mais detalhada.

O diagrama de Ishikawa organiza (agrupa) as causas que conduzem a um efeito e o Método da Árvore de falhas relaciona as causas, através do uso de portas lógicas, que conduzem a um dado efeito.

3.2 Diagrama de Ishikawa

O diagrama de Ishikawa foi desenvolvido por Kaoru Ishikawa e é também conhecido como diagrama de “Causa e Efeito”, ou digrama “Espinha de Peixe”. É uma ferramenta de fácil utilização, permitindo abordar problemas simples e complexos em diversas áreas. Por causa de sua simplicidade a explanação feita neste tópico será sucinta.

O Diagrama Causa e Efeito mostra a relação entre uma característica de qualidade (efeito) e os seus fatores (causas). Algumas vezes o número de fatores (causas) pode ser muito elevado. Nestes casos, como a análise de um processo, as causas são organizadas em famílias que podem ser: matérias primas, máquinas, medidas, meio-ambiente, mão-de-obra, método, Figura 3.1.

Na construção do Diagrama Causa e Efeito deve-se seguir os seguintes passos:

- Estabelecer o efeito (característica) da qualidade;

- Encontrar o maior número possível de causas que podem afetar o efeito da qualidade;
- Definir as relações entre as causas e construir um diagrama de causa e efeito, ligando os elementos com o efeito da qualidade por relações de causa e efeito;
- Estipular uma importância para cada causa e assinalar as causas particularmente importantes, que pareçam ter um efeito significativo na característica da qualidade;
- Registrar quaisquer informações necessárias.

Este procedimento é caracterizado pela execução de duas atividades diferentes: o levantamento de maior quantidade possível de causas, e o arranjo das causas de forma sistemática.

Muitas vezes a maior dificuldade está em alocar uma determinada causa. No entanto, isto deve ser significativo, porque o importante é lembrar e registrar a causa.

Para o levantamento das causas é necessária uma discussão franca e aberta, e um método efetivo de condução da reunião com este objetivo é o *Brainstorming*.

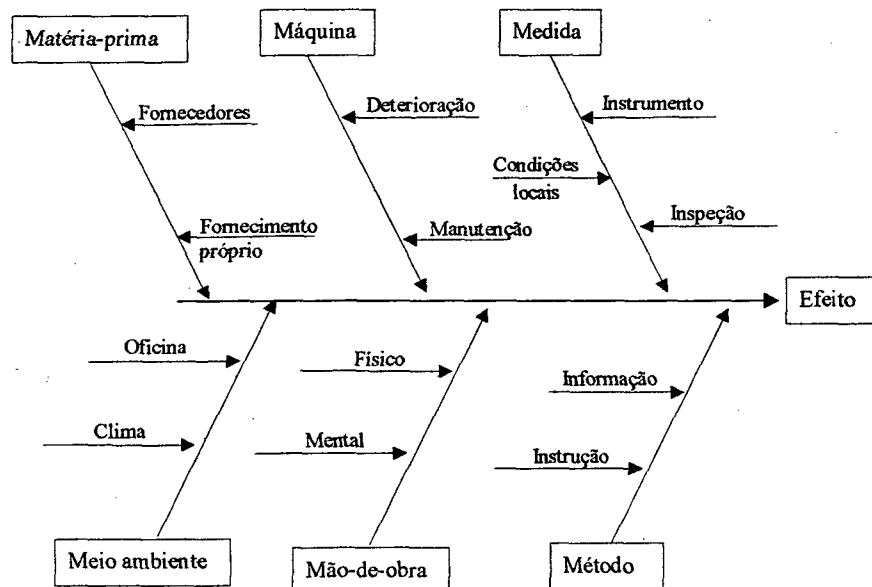


Figura 3.1 – Diagrama de Ishikawa comum (CAMPOS, 1994).

Um Diagrama de Ishikawa não precisa seguir necessariamente a estrutura apresentada na Figura 3.1. Por exemplo, num programa de melhoria da qualidade para matéria-prima na indústria sucroalcooleira as causas do aumento da quantidade de terra aderida na cana-de-açúcar que é levada para a indústria foram agrupadas segundo a Figura 3.2 (SARRIÉS, 1997 - citado por REYES). A terra é altamente prejudicial para a indústria, aumentando custos e depreciando os produtos finais. Para solucionar este problema foi reunido um grupo de pessoas que

levantaram quais poderiam ser os fatores (causas) que tinham influência na porcentagem de terra aderida na cana-de-açúcar.

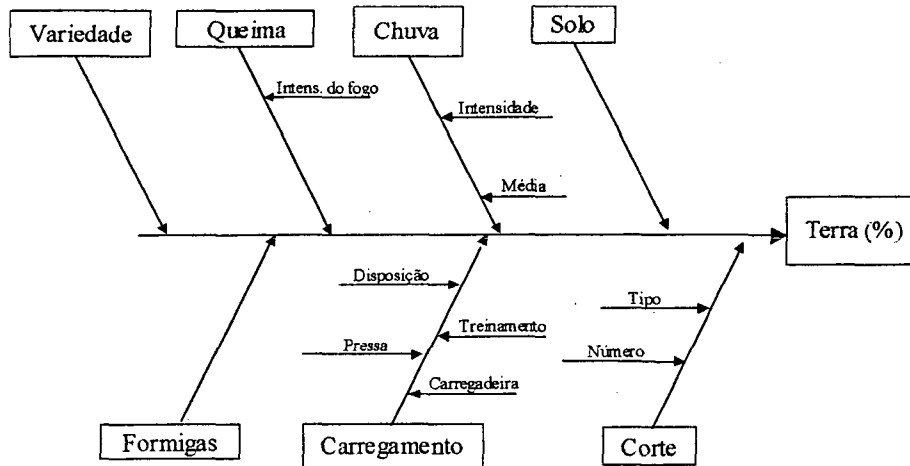


Figura 3.2 – Diagrama de Ishikawa com os principais fatores que influenciam a quantidade de terra em cana-de-açúcar (REYES e VICINO, 2000).

A Figura 3.3 apresenta um diagrama secundário, proveniente das ramificações do diagrama de Ishikawa inicial, utilizado para evitar diagramas excessivamente carregados.

Segundo o grupo, possivelmente as causas principais estavam relacionadas ao carregamento, sendo necessário que os operadores tivessem um maior cuidado e passassem por um treinamento.

O treinamento dos carregadores, tipo de carregadeira, prensa no carregamento e disposição da carga estão subordinados à causa “carregamento”. Portanto, foram agrupadas a esta ramificação. Este procedimento é repetido para as outras causas a fim de organizar e obter uma maior detalhamento das informações.

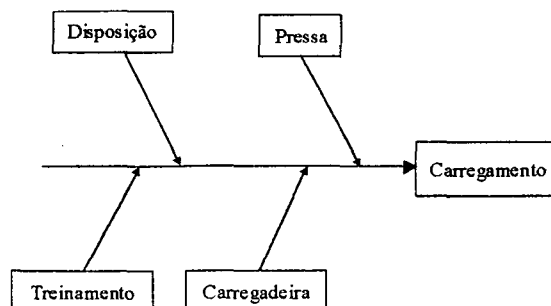


Figura 3.3 – Diagrama de Ishikawa secundário (REYES e VICINO 2000).

O uso do diagrama organiza as informações obtidas pelo *Brainstorming*, facilitando a identificação das causas de um problema e a condução das análises.

3.3 O Método da Análise da Árvore de Falhas - FTA

O Método de Análise da Árvore de Falhas foi o método escolhido para a análise da confiabilidade em sistemas por apresentar uma particularidade que o difere dos outros métodos. O método permite, além de facilitar a análise da confiabilidade de sistemas, fazer o relacionamento causa-efeito dos eventos, possibilita obter um maior conhecimento do funcionamento do sistema e dos mecanismos das falhas, facilitando seu uso com as ferramentas FMEA e o diagrama de Ishikawa.

Segundo HENLEY e KUMAMOTO (1981), a análise da árvore de falhas foi desenvolvida por H. A. Watson dos Laboratórios *Bell Telephone* em 1961-62. Os primeiros artigos publicados foram apresentados em 1965 no Simpósio de Segurança patrocinado pela Universidade de Washington e a *Boeing Company*.

O FTA “é uma técnica dedutiva formalizada que permite a investigação das possíveis causas da ocorrência de estados pré-identificados indesejados do sistema. Esse estado, referido como evento de topo, está associado com o comportamento anormal do sistema, causado por uma falha do equipamento, ou erros humanos e/ou por perturbações externas” (CONTINI, 1995).

A NASA define o FTA como sendo um método de análise de falhas do tipo *Top-down*, cuja análise inicia com um evento indesejável, como uma falha ou mal função, chamado evento de topo e então são determinadas todas as maneiras na qual este evento de topo pode ocorrer.

Para O’CONNOR (1985), é uma técnica de análise de projeto de confiabilidade/segurança que parte da consideração dos efeitos de falha do sistema, referido como “evento de topo”. Segundo O’CONNOR (1985) e a NASA (2000), após a escolha do evento de topo é feita a determinação de como os eventos de níveis inferiores, individuais ou combinados, causaram a falha do sistema.

A definição apresentada por BILLINTON e ALLAN (1985), não difere muito das definições apresentadas anteriormente e descreve que neste método, uma condição de falha particular é considerada (evento de topo) e a partir disto a árvore é construída identificando as várias combinações que conduziram a falha em estudo.

Segundo BILLINTON e ALLAN (1985), a técnica é frequentemente usada como um método de avaliação qualitativa, para auxiliar a compreensão de como um sistema pode falhar, e que medidas podem ser usadas para superar as causas da falha. O método também pode ser usado para uma avaliação quantitativa, em que as causas da falha do sistema são gradualmente separadas em um aumento do nível hierárquico até alcançar um nível, no qual os dados de confiabilidade são suficientes ou precisos para ser feita uma avaliação quantitativa. Os dados são

inseridos na árvore neste nível hierárquico e combinados, usando a lógica da árvore para facilitar a avaliação da confiabilidade do sistema que está sendo estudado.

Os benefícios da árvore de falha segundo HENLEY e KUMAMOTO (1981) são:

- Auxiliar a identificação dos modos de falha;
- Apontar os aspectos importantes do sistema para a falha de interesse;
- Fornecer auxílio gráfico para dar visibilidade às mudanças necessárias;
- Fornecer opções para análise de confiabilidade quantitativa e qualitativa;
- Permitir ao analista se concentrar em uma falha do sistema por vez;
- Facilitar o entendimento do comportamento do sistema.

As finalidades de uma Árvore de Falhas segundo HELLMAN e ANDERY (1995), citado por VOLLERT (1996) são:

- Estabelecer um método padronizado de análise de falhas ou problemas, para verificar como ocorrem em um produto ou processo;
- Analisar a confiabilidade de um produto ou processo;
- Compreender os modos de falha de um sistema;
- Priorizar as ações corretivas a serem tomadas;
- Analisar e projetar sistemas de segurança ou sistemas alternativos em produtos;
- Compilar informações para manutenção de sistemas e elaboração de procedimentos de manutenção;
- Indicar componentes mais críticos ou condições críticas de operação;
- Compilar informações para treinamento na operação de equipamentos;
- Compilar informações para planejamento de testes e inspeção;
- Simplificar e melhorar equipamentos.

3.4 Estrutura básica de uma árvore de falhas

Uma árvore de falhas pode ser desdobrada em vários níveis hierárquicos, dependendo da complexidade do sistema. São utilizados dois grupos de símbolos: as portas lógicas e os eventos.

Inicialmente será esclarecido o que é um nível hierárquico, posteriormente será apresentado os símbolos mais utilizados para as portas lógicas e eventos. Existem outros símbolos que são usados com menos frequência, por causa disso foram descritos separadamente, no anexo 1.

3.4.1 Nível hierárquico

Os níveis hierárquicos são medidos em relação ao evento de topo. Os eventos relacionados diretamente com o evento de topo representam o primeiro nível hierárquico. Os eventos relacionados aos eventos abaixo do primeiro nível hierárquico representam os eventos do segundo nível hierárquico e assim por diante. Quanto maior for a quantidade de níveis hierárquicos, maior será a quantidade de eventos encadeados, portanto mais longa será a árvore de falhas.

A árvore de falhas apresentada na Figura 3.4 ilustra o que é um nível hierárquico. Esta árvore apresenta dois níveis hierárquicos e estão sendo empregadas as portas lógicas “e” e “ou”. Os símbolos utilizados para a representação dos eventos (retângulos, círculos, losango e triângulos) serão descritos no item 3.4.3.

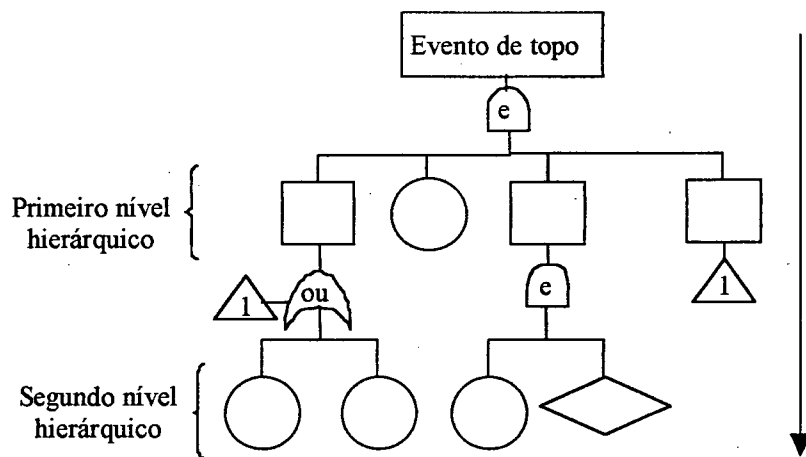


Figura 3.4 – Nível hierárquico

3.4.2 Representação de portas lógicas

As portas lógicas conectam os eventos de acordo com suas relações causais. Algumas portas lógicas podem ter mais de um evento de entrada, mas todas apresentam somente um evento de saída. Os eventos de entrada situam-se na parte inferior da porta lógica enquanto que o evento de saída situa-se na parte superior, como pode ser visto na Figura 3.5.

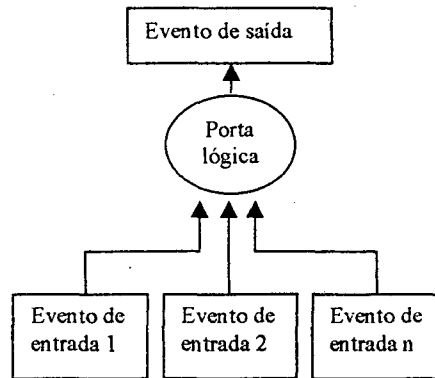


Figura 3.5 – Eventos de entrada e saída em uma porta lógica

A relação causal expressa pela porta lógica “E” ou pela porta lógica “OU” é determinística porque a ocorrência do evento de saída é completamente controlada pelos eventos de entrada. O Quadro 3.1 apresenta as portas lógicas “E” e “OU” e suas relações causais.

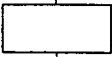
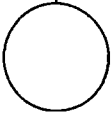


Quadro 3.1 – Portas lógicas “E” e “OU” (HENLEY e KUMAMOTO, 1981).

Símbolo	Nome	Relação causal
	E	O evento de saída “A” ocorre se todos os eventos de entrada “B ₁ , B ₂ ...B _n ” ocorrerem simultaneamente.
	OU	O evento de saída “A” ocorre se qualquer um dos eventos de entrada “B ₁ , B ₂ ...B _n ” ocorrer ou qualquer combinação destes ocorrer.

3.4.3 Representação de eventos

Os símbolos apresentados nesta seção estão presentes na Figura 3.4. Os outros símbolos (casa, oval), os quais são usados com menos frequência, estão descritos no anexo 1.

Quadro 3.2 – Representação de eventos (HENLEY e KUMAMOTO, 1981).

 retângulo	Evento representado por uma porta lógica.
 círculo	Evento básico com dados suficientes.
 losango	Evento não desenvolvido
 “transfer out” e “transfer in”	Símbolo transferência.

O evento denotado por um **retângulo** representa um evento de falha resultante de uma combinação de falhas básicas que atuam através das portas lógicas (HENLEY e KUMAMOTO, 1981).

O evento denotado por um **círculo** representa a falha básica de um componente, que representa o limite de resolução da árvore de falhas. Para obter uma solução quantitativa para a árvore de falhas, os círculos devem representar eventos para os quais se têm informações das métricas de confiabilidade (Tempo médio entre falhas, Tempo médio até a falha, confiabilidade, taxa de falhas, etc). Os eventos que aparecem nos círculos são chamados de eventos básicos. Em geral, é um evento no qual o componente em si é o responsável pelo seu acontecimento e, uma vez ocorrido, o componente deve ser reparado ou substituído (HENLEY e KUMAMOTO, 1981).

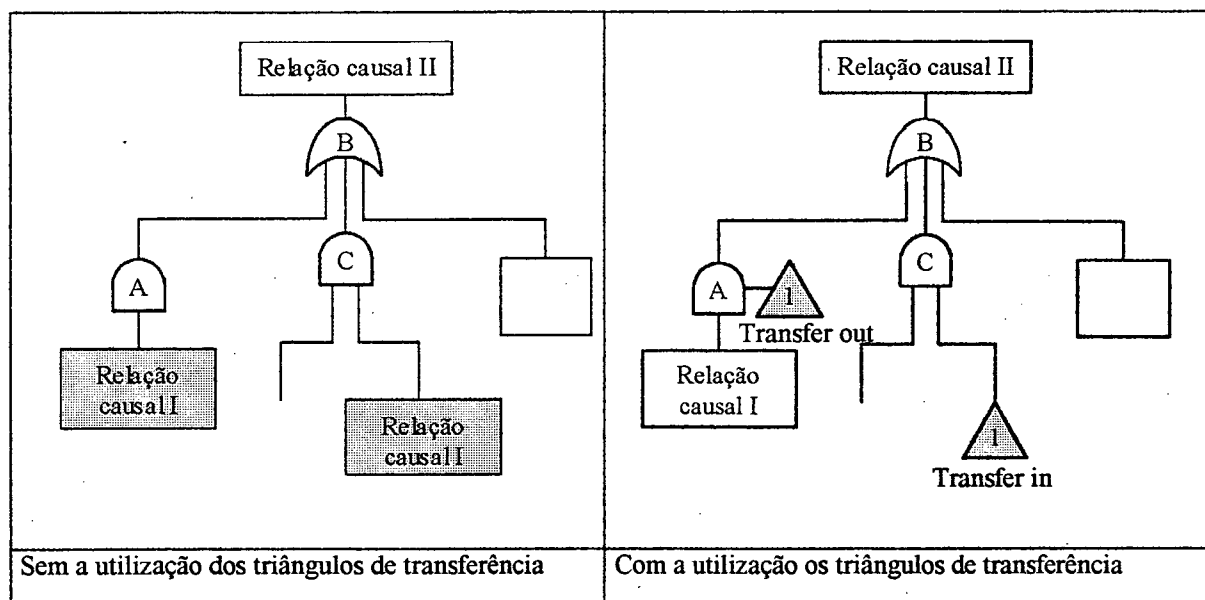
O símbolo **losango** é usado com eventos não desenvolvidos, no sentido de que uma análise detalhada nas falhas básicas não foi realizada por causa da falta de informação, dinheiro ou tempo. Frequentemente, tais eventos são removidos antes de uma análise quantitativa. São incluídos inicialmente porque uma árvore de falha é uma ferramenta de comunicação, e sua presença serve como um lembrete da profundidade e dos limites da análise (HENLEY e KUMAMOTO, 1981).

O par de **triângulos**: “Transfer-out” e “Transfer-in” se referem a duas partes idênticas de relações causais. Os triângulos que possuem o mesmo número se referem aos mesmos eventos. O triângulo “Transfer-out” tem uma linha ao seu lado que sai de uma porta lógica de onde serão usados os eventos, enquanto que o triângulo “Transfer-in” possui uma linha que sai de seu topo e

vai para outra porta lógica e representa o ponto para onde serão “transferidas” cópias dos eventos.

Os triângulos são usados para evitar a repetição de eventos iguais e para simplificar a representação da árvore de falhas, como ilustrado no Quadro 3.3. Os eventos na entrada da porta lógica “A” são os mesmos que se encontram na entrada da porta lógica “C”, logo se utilizam os símbolos “Transfer in” e “Transfer out”.

Quadro 3.3 - Ilustração do uso do símbolo “transferência” (HENLEY e KUMAMOTO, 1981).



3.5 Exemplo de uma árvore de falhas

A Figura 3.6 é um exemplo de uma estrutura de árvore de falhas, associada à falha “compressor liga-desliga”.

A falha observada é uma operação intermitente do compressor. Este começa a funcionar e logo desliga. Podem existir duas possíveis causas: Eixo trancado ou protetor térmico trocado.

No início da operação do compressor, quando a rotação do eixo é baixa, existe uma corrente elétrica bastante elevada chamada de corrente de partida. À medida que a rotação do eixo aumenta, aproximando-se da rotação de trabalho, a corrente elétrica diminui aproximando-se de um valor constante. Este período transitório de início de funcionamento tem um curto espaço de tempo, portanto não chega a causar aquecimento suficiente para desarmar o protetor térmico.

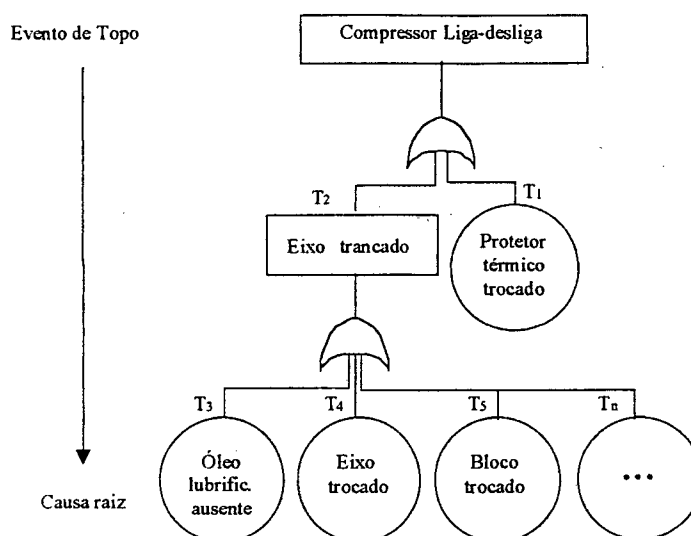


Figura 3.6 – Árvore de Falhas de um compressor (SAKURADA, 1997).

Quando o compressor permanece no estado “trancado” ou com “baixa rotação” por um tempo além do especificado, ocorre aquecimento fazendo com que o protetor térmico atue interrompendo a passagem de corrente elétrica. Após alguns instantes, o contato do protetor é refeito automaticamente e o compressor volta a ligar. Caso o eixo permaneça trancado ou com baixa rotação de trabalho, o protetor térmico voltará a desarmar.

Alguns compressores podem ser montados com o protetor térmico errado. Para fazer com que o compressor fique ligando e desligando, é necessário que o protetor térmico montado seja de uma capacidade abaixo da especificada no projeto. Desta maneira, para este protetor térmico a corrente elétrica de trabalho é excessiva, então este interrompe a passagem de corrente elétrica. Após alguns instantes, logo que o contato é refeito, o compressor volta a trabalhar e a desligar devido a atuação do protetor térmico.

A árvore de falhas na Figura 3.6 possui dois níveis hierárquicos e seus eventos estão relacionados por portas lógicas “ou”. Os eventos “Eixo trancado” e “Protetor térmico trocado” são as falhas do primeiro nível hierárquico e as falhas do segundo nível hierárquico são “Óleo lubrificante ausente”, “Eixo trocado”, “Bloco trocado”.

A falha do sistema, “compressor liga-desliga”, está no alto da árvore de falhas (evento de topo). Os eventos intermediários, da mesma forma que o evento de topo, são representados por retângulos enquanto que as causas básicas por círculos. As causas básicas representam o limite de desenvolvimento da ramificação da árvore.

A probabilidade de ocorrência do evento de topo, Q_s , é calculada pela união dos eventos T_1 e T_2 .

$$Q_S = P(Q_{T1} \cup Q_{T2}) = P(Q_{T1} + Q_{T2}) \quad (3.1)$$

$$Q_S = P(Q_{T1}) + P(Q_{T2}) - P(Q_{T1} \cap Q_{T2}) \quad (3.2)$$

$$Q_S = Q_{T1} + Q_{T2} - Q_{T1} \cdot Q_{T2} \quad (3.3)$$

O desenvolvimento da equação (3.1) foi baseado na equação (3.4). A probabilidade de ocorrência do evento T_2 é calculada da mesma maneira, através da união dos eventos $T_3, T_4, T_5 \dots T_n$, equação (3.4).

$$Q_{T2} = Q_{T3} \cup Q_{T4} \cup Q_{T5} \cup Q_{Tn} \quad (3.4)$$

Na equação (3.1) é usado o operador “união” porque a porta lógica que relaciona os dois eventos é “ou”. Caso os eventos fossem relacionados por uma porta “e” seria usado o operador “interseção”. Por exemplo:

$$Q_S = P(Q_{T1} \cap Q_{T2}) = Q_{T1} \cdot Q_{T2} \quad (3.5)$$

A expressão (3.3) foi desenvolvida para eventos independentes, não-mutuamente exclusivos. Para eventos mutuamente exclusivos não existe interseção de eventos, logo $P(Q_{T1} \cap Q_{T2})$ vale zero.

3.6 Procedimento para a construção da árvore de falhas

Para construir a árvore de falha é utilizada uma lógica inversa à empregada na árvore de eventos, partindo-se de uma determinada falha ou evento não desejado, trabalha-se numa ramificação de cima para baixo, a fim de explorar todas as combinações de eventos que podem resultar em falha (MOJENA, 1999).

O método da árvore de falhas é uma análise do tipo *Top-down*. As análises iniciam com os eventos de topo que são os eventos indesejáveis, os quais se pretende evitar. A partir disso, as causas ligadas diretamente com este evento de topo são determinadas, que são os eventos do primeiro nível hierárquico. A análise prossegue para os eventos de segundo nível hierárquico e assim por diante e dependendo da complexidade do sistema, das informações do sistema, das informações sobre as falhas, dependendo do maior ou menor detalhamento da árvore de falhas, tem-se uma maior ou menor quantidade de níveis hierárquicos. Finalmente, definir o relacionamento entre os eventos através do uso das portas lógicas.

3.7 FTA automatizados

Da mesma forma que o FMEA, muito autores têm desenvolvido FTAs automatizados para facilitar o desenvolvimento das árvores e o cálculo de confiabilidade, sendo geralmente integradas com outras ferramentas.

LIN *et al.* (1998) apresenta em seu trabalho um sistema que faz uso da teoria *Fuzzy Set* junto com o FTA para a avaliação da taxa de falhas de eventos vagos e imprecisos.

LIU *et al.* (1999) desenvolve um sistema especialista que contém informações essenciais para auxiliar no desenvolvimento de um projeto integrando informações obtidas do FMECA, FTA, Kaizen e modelos de confiabilidade.

KHAN *et al.* (2000) desenvolve um software para o uso do FTA em indústrias químicas, tendo em vista a necessidade de um sistema para avaliação de risco, que também trabalha em conjunto com outras ferramentas como: Estudo de operabilidade e risco (*Hazard and operability study* – HAZOP), FMEA, listas de verificação (*Checklists*), *Hazard survey* e Análise de risco (*Hazard Analysis* – HAZAN).

3.8 Comentários

O diagrama de Ishikawa é uma ferramenta que proporciona ao grupo de análise um conhecimento rápido do problema. O interessante é que este problema pode ser gradativamente estratificado até que se tenha razoável detalhamento do que está sendo analisado. Segundo DIAS (2000) é uma forma estruturada de estudar um problema técnico.

O diagrama de Ishikawa pode vir antes de uma Análise de Árvore de Falhas ou mesmo de um FMEA. Veja que as entradas do diagrama são as mesmas do FTA. Contudo ele não dá conta dos relacionamentos proporcionados pelas portas lógicas que são definidas no FTA. Não seria possível, por exemplo, fazer uma análise de confiabilidade. O diagrama é estruturado como se todas as causas estivessem em série, para um determinado efeito.

O FTA é uma ferramenta que concorre com algumas das que foram apresentadas no Capítulo 2. Ao mesmo tempo, pode ser usado em paralelo ou como complemento, ou mesmo servir-se de alguma técnica para extrair o máximo de informação possível do sistema que está sendo analisado, como foi feito no item 3.7.

A NASA utiliza o FTA depois da ferramenta FMEA. Ela enquanto uma contratante de projetos e serviços, exige primeiro uma análise tipo FMEA e com os respectivos modos de falha ela avalia, pela árvore de falhas, as diversas possibilidades da não-função (evento de topo)

ocorrer. Com certeza este não é um processo que ocorre linearmente, muitas idas e vindas são feitas até que todas as possibilidades de falha estejam discutidas e registradas.

Neste trabalho, a Árvore de Falhas foi utilizada para facilitar a comunicação entre o engenheiro do conhecimento e o especialista. O diagrama de Ishikawa foi utilizado para correlacionar os módulos existentes na máquina de transplante de mudas e os efeitos não desejáveis: não transplantar mudas e danificar mudas.

Capítulo 4

FMEA – Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o FMEA, tendo como tópicos as definições, descrição da equipe responsável pelo desenvolvimento, procedimentos (etapas), as aplicações (projetos, processos, serviços), relacionamentos com outros FMEAs, quando executar e o respectivo formulário. Apresenta-se também a definição de Análise do Modo de falha, Efeitos e Criticalidade (FMECA) e seus relacionamentos com o FMEA.

4.2 Histórico

Não há se sabe a data em que surgiu o FMEA. Em alguns trabalhos não é possível saber se a data é referente ao FMEA ou ao FMECA. Por exemplo, analisando o texto a seguir:

“O FMEA teve sua origem nos Estados Unidos no dia 9 de novembro de 1949, como um padrão para as operações militares - *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (Military Procedure MIL-P-1629)*. Esta norma foi utilizada como uma técnica de avaliação da confiabilidade para determinar os efeitos nos sistemas e falhas em equipamentos. As falhas foram classificadas de acordo com seus impactos nos sucessos das missões e com a segurança pessoal/equipamento” (www.fmeca.com, 2000). A norma MIL-P-1629 executa a análise de criticalidade em seu procedimento, logo, não deveria ser FMEA, e sim FMECA.

O FMECA, atualmente, é denominado de *Military Standard MIL-STD-1629A* e teve o seu início na indústria automobilística nos anos 70. Em 1988, a Organização Internacional de Padronização (*International Organization of Standardization*) lançou a série ISO 9000, dando um impulso às organizações para desenvolverem um Sistema de Gerenciamento de Qualidade formalizado e direcionado às necessidades, desejos e expectativas dos clientes. A QS 9000 é um padrão da indústria automotiva análogo à ISO 9000. As empresas *Chrysler Corporation*, *Ford*

Motor Company e *General Motors Corporation* desenvolveram a QS 9000 em um esforço para padronizar o sistema de qualidade fornecedor.

De acordo com a QS 9000, os fornecedores de automóveis devem utilizar o Planejamento de Qualidade de Produto Avançado (*Advanced Product Quality Planning – APQP*), incluindo FMEAs de projeto e de processo, e desenvolver um Plano de Controle. Atualmente um novo padrão está sendo desenvolvido pela SAE (*Society Automotive Engineering*) junto com as empresas: *General Motors Corporation*, *Ford Motor Company* e a *Chrysler Corporation* (www.fmeca.com, 2000).

4.3 Áreas de utilização do FMEA atualmente

O FMEA tem sido utilizado nas mais diversas áreas:

- Equipamentos de semicondutores (VILLACOURT, 1992);
- Sistemas hidráulicos e pneumáticos (LATINO, 1996), (BULL *et al*, 1995);
- Circuitos elétricos (PRICE, 1996);
- Desenvolvimento de reator termonuclear (PINNA *et al*, 1998).
- Indústrias siderúrgicas (CASTRO, 2000);

O FMEA é frequentemente utilizado com a Análise da Árvore de Falhas (FTA), mas pode ser usado com outras ferramentas, por exemplo, com o QFD (Quality Function Deployment) (SOUZA, 2000), FCM (Mapas Cognitivos *Fuzzy*) (PELÁEZ, 1996).

Segundo HAWKINS e WOOLLONS (1998) uma das maiores críticas a respeito do uso do FMEA é o tempo consumido. Esse problema tem sido amenizado com o uso dos FMEAs automatizados.

O desenvolvimento dos computadores, das linguagens e das interfaces para programação, tem favorecido o desenvolvimento de FMEAs automatizados e vários autores (BULL *et al*, 1995; PRICE, 1996; PELÁEZ, 1996; RAIMOND *et al*, 1997) iniciaram o desenvolvimento de *softwares* para auxiliar nas atividades como: o preenchimento dos formulários, gerenciamento das reuniões e o cadastro das falhas. HUANG *et al* (1999) apresenta um protótipo de FMEA automatizado com suporte para *Internet*, isto é, os participantes de uma reunião poderiam estar em diversas partes do mundo executando o mesmo FMEA.

4.4 Definições

A Associação Brasileira de Norma Técnicas (ABNT), na norma NBR 5462 (1994), adota a sigla originária do inglês FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) e a traduz como sendo Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos. Observa-se que a norma utiliza o termo pane para expressar falha. Ainda segundo a norma, o FMEA é um método qualitativo de análise de confiabilidade que envolve o estudo dos modos de falhas que podem existir para cada item, e a determinação dos efeitos de cada modo de falha sobre os outros itens e sobre a função específica do conjunto.

A *Military Standard* (MIL-STD 1629A) (1980), identifica como sendo um procedimento pelo qual cada modo de falha potencial em um sistema é analisado para determinar os resultados ou efeitos no sistema e para classificar cada modo de falha potencial de acordo com a sua severidade.

FMEA é uma técnica analítica utilizada por um engenheiro/time como uma maneira de garantir que, até a extensão possível, os modos potenciais de falha e suas causas/mecanismos associados tenham sido considerados e localizados. Na sua forma mais rigorosa, o FMEA é um sumário do conhecimento do engenheiro/time (incluindo uma análise de itens que poderiam falhar baseado na experiência e em assuntos passados) de como um produto ou processo é desenvolvido. Esta abordagem sistemática confronta e formaliza a disciplina mental que um engenheiro passa em qualquer processo de planejamento de manufatura (*Ford Motor Company*, 1997).

Um dos requisitos para a utilização da ferramenta é que se tenha total conhecimento do que é modo de falha e efeitos. Portanto, para iniciar o estudo foi feito o uso do dicionário MICHAELIS (2000), sendo consultado os seguintes termos: MODO, FALHA e EFEITO.

- MODO é a “Forma ou maneira de ser ou manifestar-se uma coisa”; “Maneira ou forma particular de fazer as coisas, ou de falar”; “Maneira de conseguir as coisas; meio, via”.
- FALHA: “Defeito”, “Desarranjo, enguiço” ou “ato ou efeito de falhar”, sendo que FALHAR está descrito como “Não dar o resultado desejado, não ser como se esperava”.

Desta forma, pode-se então começar a definir MODO DE FALHA como sendo: “a forma do defeito”, “maneira na qual o defeito se apresenta”, “maneira com que o item falha ou deixa de apresentar o resultado desejado ou esperado”, “é um estado anormal de trabalho, a maneira que o componente em estudo deixa de executar a sua função ou desobedece as especificações”.

O modo de falha é uma propriedade inerente a cada item, visto que cada item tem suas características particulares como função, ambiente de trabalho, materiais, fabricação e qualidade. Por exemplo, para um eixo pode-se ter como modo de falha, ruptura, empenamento, desgaste e, para um filtro pode-se ter, rompido, entupido e assim por diante.

Existem duas abordagens para levantar os modos de falha: Funcional e Estrutural.

A abordagem funcional (Quadro 4.1) é genérica, não necessita de especificações de projeto ou de engenharia. Pode ser tratada como uma não-função. Por exemplo:

Quadro 4.1 – Modo de falha com a abordagem funcional.

Componente	Função	Modo de falha
Eixo	Transmitir movimento, torque.	Não transmite movimento, não transmite torque.

A abordagem estrutural necessita de informações de engenharia as quais muitas vezes não estão facilmente disponíveis. Tanto na abordagem funcional como na abordagem estrutural é muito importante que se tenha, bem definida, a função do componente, pois é a referência para se verificar quando o item está em falha ou não. O Quadro 4.2 apresenta os modos de falha para um eixo adotando a abordagem estrutural.

Quadro 4.2 – Modo de falha com a abordagem estrutural.

Componente	Função	Modo de falha
Eixo	Transmitir movimento, torque.	Ruptura, empenamento, desgaste...

- EFEITO: “Resultado produzido por uma ação ou um agente, denominados causa em relação a esse resultado”, “conseqüência, resultado”, “fim, destino” (MICHAELIS, 2000).

Pode se dizer que os EFEITOS do modo de falha são os resultados produzidos quando estes vêm a ocorrer, são as conseqüências do modo de falha. Em outras palavras, o efeito é a forma ou maneira de como o modo de falha se manifesta ou como é percebido em nível de sistema. O modo de falha ocorre internamente, em nível de componentes, subsistemas, gerando efeitos externos, Figura 4.1.

Na identificação dos efeitos, deve-se perguntar: O que pode acontecer com o desenvolvimento deste modo de falha? O que isto causa no sistema? O que o cliente vê? Quais os danos que isso pode causar ao ambiente?

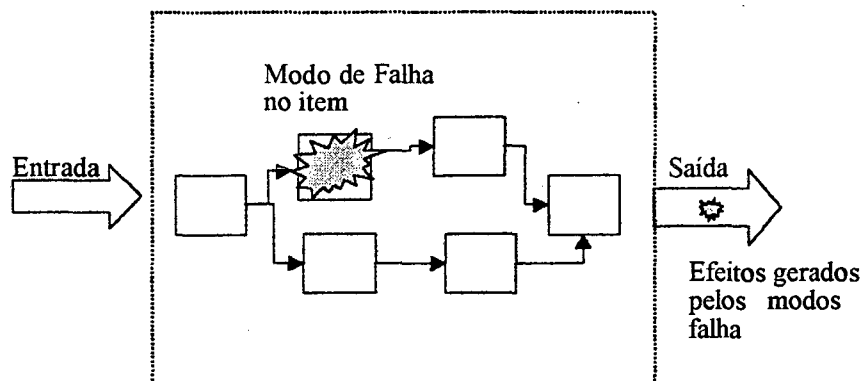


Figura 4.1 – Indicativo de que o Modo de falha é uma ação interna e efeito uma ação externa

- CAUSA: “Aquilo que determina a existência de uma coisa”; “O que determina um acontecimento”; “agente, motivo, razão”; “origem, princípio” (MICHAELIS, 2000).

As causas do modo de falha são os motivos que levaram o modo de falha a ocorrer, podem estar nos componentes da vizinhança, fatores ambientais, erros humanos, ou no próprio componente.

Em resumo, vale ressaltar, embora as definições sejam simples, nem todas as falhas poderão se ajustar a estas definições, podendo gerar muitas discussões em uma reunião de FMEA. Deve-se ter em mente que, um modo de falha é uma anomalia que ocorre em nível de componente e um efeito ocorre em nível de sistema. Esta anomalia deve ser caracterizada em termos de função ou especificações de projeto, processo ou uso.

Uma maior discussão pode ocorrer entre modo de falha e causa do modo de falha. Os membros da equipe devem ter consciência de que o importante é que a falha seja considerada na análise, para que posteriormente sejam tomadas as medidas necessárias para sua eliminação. Este problema voltará a ser discutido no estudo de caso realizado na bomba de engrenagens, que será discutido no capítulo 5.

4.5 O que é o FMEA

O 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. O modo de falha é a expressão utilizada para caracterizar o processo e o mecanismo de falha que ocorre nos itens. O efeito é maneira como o modo de falha se manifesta. Cada item pode ter diferentes modos de falha. Um determinado modo de falha vai se tornar mais ou menos evidente, dependendo da função que o item está desempenhando naquele caso específico. O efeito, por sua vez, segue a mesma sistemática.

A relação entre modo de falha e efeito, se bem controlada, pode tornar-se uma ajuda muito grande para a análise da confiabilidade e também para os processos de manutenção a serem adotados. A dificuldade é grande neste relacionamento dado que diferentes modos de falha podem se manifestar da mesma maneira, ou seja, apresentam o mesmo efeito. Essa complexidade torna-se ainda mais evidente quando da associação de um item a outro.

Por exemplo, um eixo enquanto um elemento de máquina isolado pode ter modos de falha do tipo: fratura abrupta, fratura por fadiga, empenamento. Se associado ao mancal, e o eixo estiver girando, pode-se considerar, ainda, os modos de falha: eixo trancado e eixo desalinhado. Tanto o modo de falha “empenamento” quanto eixo desalinhado tem como efeito, quando o eixo gira, a vibração. Esse efeito pode ser produzido também por problemas específicos dos mancais que suportam o eixo ou por outros componentes que estão montados no eixo.

Outro aspecto importante a ser abordado na análise do FMEA é a causa geradora do modo de falha. Embora muitos modos de falha sejam inerentes ao item em análise, o estudo das causas permite aprofundar a relação entre o item e a função e gerar procedimentos mais consistentes para aproveitar bem os efeitos, nas suas primeiras manifestações, no sentido de tomar as providências requeridas antecipando-se à perda da função devido à ocorrência do modo de falha.

Com base nas análises feitas sobre os modos de falha e seus efeitos, são tomadas ações que posteriormente sofrerão uma reavaliação e documentação. O material gerado pelo FMEA tem como função servir como uma ferramenta para prognóstico de falhas e auxiliar o desenvolvimento/análise de projeto de produtos, processos ou serviços.

O FMEA, por ser um registro, pode evitar que problemas passados venham a ocorrer novamente buscando a melhoria contínua, sendo um documento vivo, atualizado e representa as últimas mudanças realizadas do produto.

O conhecimento dos modos de falha dos itens, em qualquer fase do ciclo de vida do produto, permite tomar as providências aos técnicos, na fase do ciclo de vida que se está analisando, para evitar a manifestação daquele modo de falha. Assim, portanto auxilia nos aspectos da manutenibilidade e da confiabilidade. O material gerado pode também servir em programas de capacitação, proporcionando um melhor entendimento dos componentes e do sistema. Com isso, tem-se um maior conhecimento a respeito das falhas facilitando a escolha do tipo de manutenção (corretiva, preventiva, preditiva), garantindo maior disponibilidade¹ do equipamento.

4.6 O que é o FMECA

A sigla FMECA tem origem da seguinte expressão em inglês *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis* e é ser traduzida como Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticalidade.

Muitos autores, KUME [1996], PALADY (1997), STAMATIS (1995), VILLACOURT (1992), propõem discutir a respeito do FMEA, mas na verdade se referem ao FMECA. MOHR (1994) apresenta a diferença entre FMEA e FMECA da seguinte maneira:

$$\text{FMECA} = \text{FMEA} + \text{C} \quad (4.1)$$

onde,

$$\text{C} = \text{Criticalidade} = (\text{Ocorrência}) \times (\text{Severidade}) \quad (4.2)$$

O índice Ocorrência é usado para avaliar as chances (probabilidade) da falha ocorrer, enquanto que a Severidade avalia o impacto dos efeitos da falha, a gravidade dos efeitos.

Todos os autores relacionam a severidade aos efeitos dos modos de falha. No entanto, a Ocorrência é relacionada, dependendo do autor, ao modo de falha ou às causas do modo de falha.

Existe ainda uma outra métrica do FMECA, que se chama índice de detecção das falhas, Figura 4.2. Este também é relacionado aos modos de falha ou às causas do modo de falha.

Em muitos trabalhos, não fica claro se estamos relacionando os índices ao modo de falha ou às causas do modo de falha, sendo encontrado frequentemente questões como:

¹ Disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados (Dias, 1997).

- Quais são as chances da falha ocorrer?
- Quais são as chances de se detectar a falha antes que ela alcance o cliente?

Afinal, as duas questões referem-se ao modo de falha ou às causas da falha? Esta questão foi observada por PALADY (1997) e este afirma que, independente da abordagem, os resultados obtidos são os mesmos. As duas abordagens estão ilustradas na Figura 4.2.

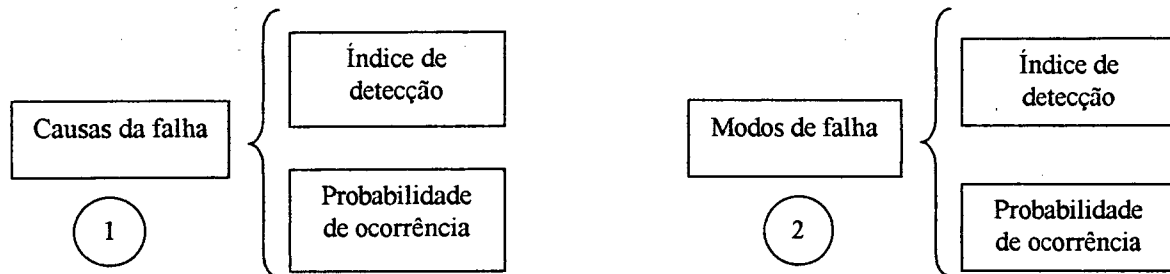


Figura 4.2 – (1) Índices baseados nas causas. (2) Índices baseados nos modos de falha.

No FMECA é calculado o Número de Prioridade de Risco (NPR) sendo que em algumas abordagens o valor é atribuído ao modo de falha e em outras a cada causa do modo de falha. A expressão (4.3) é bastante similar à expressão para o cálculo da criticalidade (4.2), diferenciando apenas pela parcela de detecção.

$$\text{NPR} = \text{Ocorrência} \times \text{Severidade} \times \text{Detecção} \quad (4.3)$$

Detecção é um valor que mostra a eficiência dos controles de detecção da falha (modo de falha ou causa do modo de falha). Quanto maior for o valor atribuído ao índice de detecção significa que maior será a dificuldade de detectar a falha.

A seguir são apresentados exemplos de tabelas utilizadas para estimar os índices de severidade, ocorrência e detecção.

Quadro 4.3 – Probabilidade de ocorrência (BEM-DAYA e RAOUF, 1996)

Probabilidade de ocorrência	Chances de ocorrência	Escore
Remota	0	1
Baixa	1/20,000	2
	1/10,000	3
Moderada	1/2,000	4
	1/1,000	5
	1/200	6
Alta	1/100	7
	1/20	8
Muito alta	1/10	9
	1/2	10

Quadro 4.4 – Severidade dos efeitos (BEM-DAYA e RAOUF, 1996)

Severidade	Escore
O cliente provavelmente não tomará conhecimento	1
Leve aborrecimento	2 - 3
Insatisfação do cliente	4 - 6
Alto grau de insatisfação	7 - 8
Atinge as normas de segurança	9 - 10

Quadro 4.5 – Índice de detecção das falhas (BEM-DAYA E RAOUF, 1996)

Probabilidade de não detectar a falha	Probabilidade (%) de um defeito individual alcançar o cliente	Escore
Remota	0 - 5	1
Baixa	6 - 15	2
	16 - 25	3
Moderada	26 - 35	4
	36 - 45	5
	46 - 55	6
Alta	56 - 65	7
	66 - 75	8
Muito alta	76 - 85	9
	86 - 100	10

Sistema: Mecanismo distribuidor de mudas		Participantes: Waulton M. Carrafa Eduardo Y. Sakurada Acires Dias				Página: 1 de 1 Data original: 05/09/00 Data de revisão: 09/11/00								
Componente	Função	Modo potencial de falha	Efeitos potenciais de falha	S e v	Causas potenciais / Mecanismos de falha	Controles atuais	D e t e c t e	Ações recomendadas	Responsabilidade & data de conclusão limite	Resultado das Ações				
										Ações Tomadas	S O D N e c e p v c l R			
1 - Alojador de mudas	- Alojador a muda	Quebrado	Impede a conexão da muda		Máximo não fixo, cargas desbalanceadas	Testes, revê-lo de projeto.		- Utilizar um alojador mais resistente - Utilizar uma lava na suspensão - Incluir uma placa de polímero na mesa.	Waulton	Incluir uma placa de polímero na mesa				
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
			Planta de muda danificada		Vibrações, cargas desbalanceadas	Testes, revê-lo de projeto.								
<p>1 - Identificar o nome do sistema ou o título de identificação do FMEA; 2 - Nome das pessoas que estão participando da reunião; 3 - Registrar a página do formulário, a data de início do projeto de FMEA e a data da reunião atual; 4 - Nome do item (componente, subsistema); 5 - A função que o item deve desempenhar;</p> <p>6 - Possíveis modos de falha; 7 - Possíveis efeitos que podem ser causados no sistema; 8 - Valor de 1 a 10 do índice de severidade dos efeitos; 9 - As causas que podem ter desencadeado o modo de falha; 10 - Valor de 1 a 10 do índice de ocorrência da falha (modo de falha ou causa do modo de falha);</p> <p>11 - Controles atuais são os métodos para identificar e controlar as falhas. 12 - Valor de 1 a 10 do índice de detecção da falha (modo de falha ou causa do modo de falha); 13 - Número de prioridade de risco. NPR = (severidade) x (ocorrência) x (detecção); 14 - Ações recomendadas pelo grupo para a eliminação da falha.</p> <p>15 - Nome da pessoa responsável em implementar a ação e data limite para conclusão das ações; 16 - Ação que foi utilizada para a eliminação da falha. 17 - Reavaliação dos índices e cálculo do novo NPR.</p>														

Figura 4.3 – Formulário FMECA adaptado da SAE (2000).

Os leiautes dos formulários são desenvolvidos de acordo com o critério de cada empresa, não existindo uma padronização. A Figura 4.3 apresenta um formulário FMECA, com uma breve descrição de seus campos, e a Figura 4.4 um FMEA. Verifica-se que para executar um FMECA, é necessário que se tenha bem mais informações sobre o produto do que no FMEA, por exemplo, que permitam avaliar a probabilidade de ocorrência da falha, detecção e também informações que permitam avaliar o impacto da falha no cliente, no meio ambiente ou nas normas governamentais.

O formulário FMEA é bem mais simples e não possui os campos, 8 (índice de severidade), 10 (índice de ocorrência), 11 (controles atuais), 12 (índice de detecção), 13 (Número de prioridade de risco) e 17 (revisão dos índices).

A seguir, tem-se a descrição de cada um dos campos.

Identificação do sistema (1): Identificar o nome do sistema ou o título de identificação do FMEA. No caso de FMEA de processo, deve-se identificar o nome do processo, da montagem ou da peça.

Participantes (2): Nome das pessoas da equipe FMEA que estão presentes na reunião.

Página e datas (3): Número da página, datas de início (dia/mês/ano) das reuniões para o desenvolvimento do FMEA e data atual.

Componente (4): Nome dos componentes do sistema.

Função (5): O engenheiro escreve a intenção, propósito, meta ou objetivo do componente. A função deve ser escrita de uma maneira concisa e fácil de entender, usando termos específicos, preferencialmente com um verbo e um substantivo.

Modo potencial de falha (6): O problema, a preocupação, a oportunidade de melhoria, a falha. Quando alguém pensar nos modos potenciais de falha, deve pensar na perda da função do sistema – uma falha específica. Para cada função do sistema identificado na coluna 10 da planilha, deve-se listar a correspondente falha do sistema., podendo existir mais de uma falha por função.

Efeitos potenciais de falha (7): São as conseqüências que surgem no sistema causadas pelos modos de falha. Eles devem ser identificados, avaliados e registrados para cada modo de falha. As conseqüências podem ser para o sistema, produto, cliente ou para as normas governamentais. Deve-se descrever os efeitos em termos do que o usuário pode perceber ou sentir. O usuário tanto pode ser um cliente interno ou externo (montadora ou consumidor final).

Severidade do efeito (8): Severidade é um índice que indica o quão sério é o efeito do modo de falha potencial. A severidade sempre é aplicada sobre o efeito do modo de falha. Há

uma correlação direta entre o efeito e a severidade. Quanto mais grave e crítico é o efeito maior é o índice de severidade. Severidade é revisada da perspectiva do sistema, outros sistemas, do produto, do cliente, e/ou normas governamentais. O índice de severidade só pode ser alterado mediante uma mudança no projeto. Pode assumir valores de 1 a 10.

Causas potenciais da falha (9): A causa do modo de falha é causa geradora do modo de falha. Pode estar no componente, nos componentes vizinhos, ambiente.

Ocorrência (10): Ocorrência é um índice que corresponde a um número estimado (algumas vezes um número cumulativo) das falhas que poderiam ocorrer. Deve ser baseado ou na causa ou no modo de falha. A ocorrência pode ser reduzida mediante melhorias nas especificações de engenharia e /ou nos requerimentos do processo com a intenção de prevenir as causas e reduzir suas frequências.

Controles atuais (11): Um método (procedimento), teste, revisão de projeto ou uma análise de engenharia. Eles podem ser muito simples, como por exemplo *Brainstorming*, ou bastante técnicos e avançados, como por exemplo, método dos elementos finitos, simulação computacional e testes de laboratório. O objetivo do método de detecção é identificar e eliminar as falhas antes que estas atinjam os clientes (externos ou internos).

Deteção (12): Deteção é a probabilidade de que os sistemas de controle detectem a falha (causa ou modo de falha) antes que esta atinja os clientes (internos ou externos). Para identificar um índice de detecção deve-se estimar a habilidade para cada um dos controles identificados no item 11 para detectar a falha antes que ela alcance o cliente. O índice de detecção pode assumir valores de “1” a “10”. O índice de detecção pode ser reduzido adicionando ou melhorando as técnicas de avaliação do projeto/processo, aumentando o tamanho das amostras.

Número de prioridade de risco (NPR) (13): É o índice resultado do produto do índice de ocorrência, de severidade e detecção. Este valor define a prioridade da falha. É usado para ordenar (classificar) as deficiências do sistema.

Ações recomendadas (14): Nenhum FMEA deve ser feito sem nenhuma ação recomendada. A ação recomendada pode ser uma ação específica ou pode ser um estudo mais adiante. A idéia das ações recomendadas é diminuir os índices de severidade, ocorrência e detecção.

Responsabilidade e data de conclusão limite (15): Deve-se eleger os responsáveis para as tomadas de ações e definir prazos para a entrega dessas ações.

Ações tomadas (16): Só porque algo foi recomendado, não significa que algo foi feito. É imperativo que alguém siga as recomendações para determinar se elas foram direcionadas adequadamente, e/ou se é necessário fazer atualizações nestas ações. Note que o FMEA é um documento vivo e como tal alguém deve ser responsável em atualizá-lo. Depois que as ações fossem tomadas, uma breve descrição da ação deveria ser feita.

Número de prioridade de risco revisado (17): Depois das ações estarem incorporadas no sistema, a equipe FMEA deveria reavaliar as conseqüências da severidade, ocorrência e detecção. Os resultados deveriam ser revisados pelo time FMEA e um novo NPR ser calculado e as falhas serem ordenadas. Este processo é repetido até o time de FMEA decidir que todas as informações relevantes foram cobertas. Se nenhuma ação for tomada, então estas colunas permanecerão em branco.

Nota-se que, muitas das informações requeridas no formulário FMECA são indisponíveis nas fases iniciais do processo de projeto, informacional e conceitual. Os formulários, contudo, apresentam uma série de requisitos que devem constar das matrizes de decisão utilizadas nos processos iniciais. Só será possível, verificar a comprovação de que os índices requeridos e o grau atribuído estão presentes no produto final, se houver um planejamento de um experimento voltado para este objetivo ou então, do acompanhamento do produto no uso. Observa-se que nestes casos, está se trabalhando na fase do projeto preliminar ou detalhado. Têm-se aí os conceitos bem definidos, e estão sendo analisados alguns aspectos destes conceitos, representados pelos seus modelos físicos, na forma de desenhos preliminares, modelos detalhados ou “MOCAP”.

No FMECA, quando não se têm os índices de ocorrência da falha, deve-se recorrer a produtos similares no mercado para se obter uma estimativa, ou realizar testes com protótipos. A avaliação do índice de detecção vai depender dos sistemas de controle existentes, no projeto e no processo de fabricação de cada empresa.

Um formulário FMEA, de uma forma geral, apresenta o seguinte formato (Figura 4.4):

Sistema: _____		Participantes: _____		Página: _____ de _____	
				Data de início: _____	
				Data de revisão: _____	
Componente	Função	Modo de falha potencial	Efeitos potenciais de falha	C l a s s e s	Causas potenciais / Mecanismos de falha
					Ações recomendadas
					Responsabilidade & data de conclusão limite

Figura 4.4 – Formulário FMEA adaptado da SAE (2000).

4.7 Como avança o FMEA/FMECA na análise da falha

A análise que geralmente é feita pelo FMEA é denominada *Bottom-up*, porque parte da análise dos modos de falhas dos componentes e estende-se até os efeitos causados no sistema. Pode-se empregar a análise do tipo *Top-down*, que parte dos efeitos no sistema e procura-se determinar as causas destes efeitos, como será visto no capítulo 4.

A Figura 4.5, exemplifica um fragmento da análise *Bottom up* em um compressor. O eixo de comando do cilindro está trancado. Este modo de falha pode gerar os seguintes efeitos no sistema: Compressor liga e desliga, o compressor simplesmente não parte ou o compressor não parte e proporciona fuga de corrente para a carcaça.

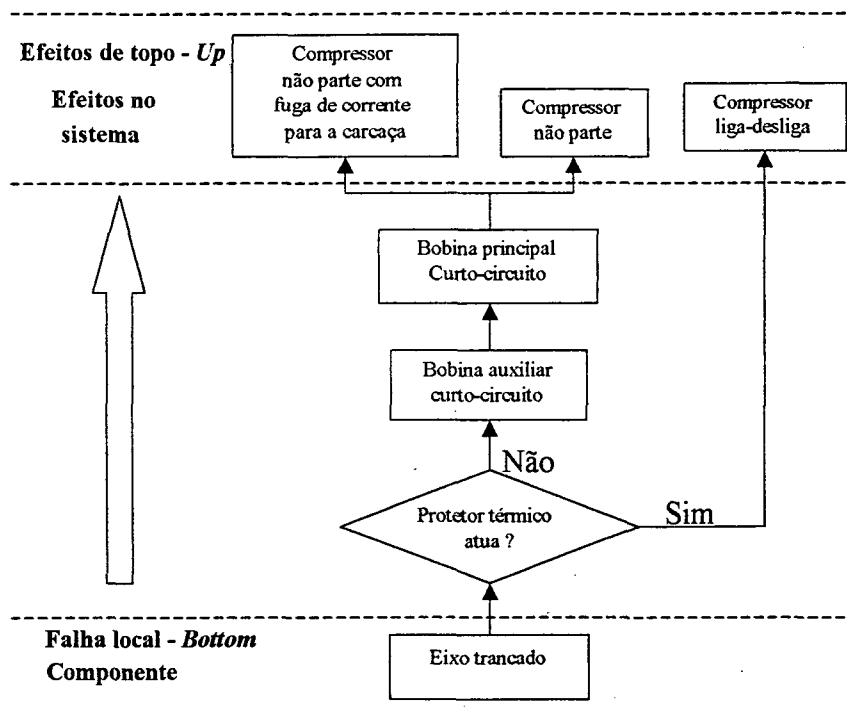


Figura 4.5 – Análise do tipo *Bottom-up* (SAKURADA, 1997).

No início do funcionamento, quando a rotação do eixo é baixa, uma corrente elétrica elevada, temporária, percorre a bobina auxiliar, chamada de corrente de partida. À medida que a rotação do eixo aumenta, a corrente elétrica diminui. Quando é atingida a rotação de trabalho, a corrente elétrica fica aproximadamente constante, neste momento deixa de passar pela bobina auxiliar e passa a percorrer a bobina principal.

Quando a rotação do eixo não atinge a rotação de trabalho, a corrente elétrica permanece elevada causando aumento da temperatura que pode fazer com que seus enrolamentos (bobinas) se alonguem ou pode deteriorar os seus isolamentos causando curto-circuito. Para evitar estes problemas os compressores são construídos com mecanismos protetores para desligar o motor, temporariamente, se houver aumento elevado de temperatura ou consumo elevado de corrente elétrica. Estes mecanismos são chamados de protetores térmicos.

Normalmente, o protetor térmico está ligado em série com a linha de alimentação de energia do compressor, de modo que toda a corrente passe através dele. Se houver aumento

excessivo de temperatura, tanto devido à temperatura ambiente como pela passagem de corrente elétrica, ocorre o corte do fornecimento de energia. Quando a temperatura reduzir, o protetor térmico fecha o circuito automaticamente e se o eixo estiver trancado ocorrerá a repetição deste processo. Desta forma, o compressor ficará ligando e desligando.

Quando ocorre algum problema com o protetor térmico e este não interrompe o circuito, ocorre curto-circuito na bobina auxiliar que causa degradação dos isolamentos que finalmente pode causar curto-circuito na bobina principal. O efeito percebido é que o compressor não parte (não liga) e algumas vezes além de não partir, proporciona fuga de corrente para a carcaça.

Esta é uma análise do tipo *Bottom up*, tem início com um modo de falha (trancado) no componente (eixo) e desenvolve-se até os efeitos no sistema (compressor). Observa-se que este tipo de análise pode ser feito ainda no final do projeto conceitual ou na fase do projeto preliminar.

4.8 Quando iniciar um FMEA/FMECA

Segundo VILLACOURT (1992), nos primeiros estágios do ciclo de vida do produto é onde se tem maior influência na confiabilidade do produto. À medida que o projeto amadurece, torna-se mais difícil para alterá-lo. Infelizmente, o tempo, o custo, e os recursos requeridos para corrigir um problema, detectado nas fases finais do processo de projeto, aumentam.

Como está evidenciado na Figura 4.6, nas primeira fases do processo de projeto, investe-se em torno de 15 % do custo total do projeto, mas decide-se sobre 95 % do custo do ciclo de vida do produto. Essa é uma constatação que evidencia a importância de investir-se em pesquisa e desenvolvimento, para que seja considerado o máximo de informação e técnicas, nas fases iniciais do processo de desenvolvimento de produtos.

Segundo DOWNEY, citado por BACK e FORCELLINI (1998), 80% do custo do produto fica comprometido com 20 % da fase do projeto realizado. Isso corresponde à fase de projeto conceitual concluída.

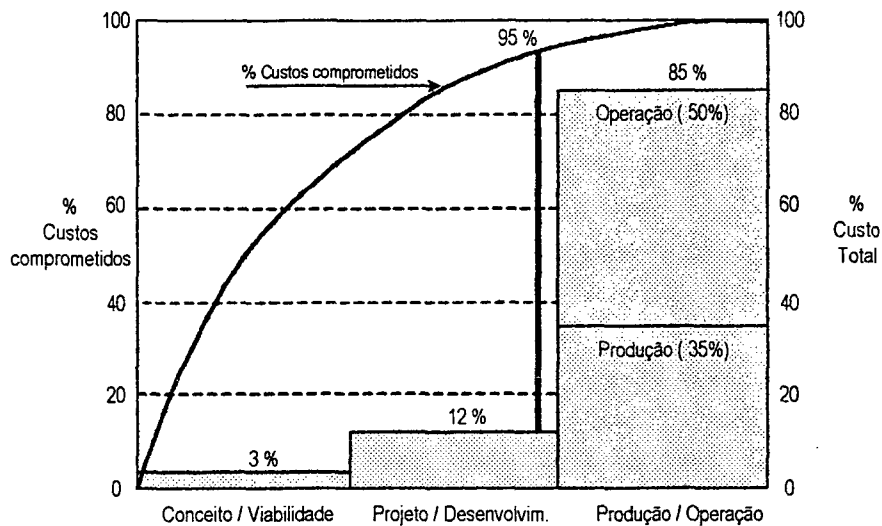


Figura 4.6 – Os custos comprometidos ao longo do desenvolvimento do produto (VILLACOURT, 1992).

A frase citada por TENG e HO (1996), “a melhor confiabilidade é a confiabilidade especificada no projeto do produto”, manifesta a importância da confiabilidade nas etapas do processo de projeto.

Por esses motivos o FMEA deve ser iniciado o mais rápido possível. Quanto mais cedo for feito o FMEA, mais fácil e barato serão as mudanças para a melhoria do produto. No entanto, nas fases iniciais de projeto (projeto conceitual) as informações são bastante reduzidas, sendo então utilizada a abordagem funcional para os modos de falha. Contudo, em tendo-se conhecimento da técnica de FMEA/FMECA e das métricas a ela vinculada, pode-se já nas primeiras fases iniciais, levantar todos os requisitos requeridos para considerar este processo de análise ao longo do projeto.

Após a fase do projeto detalhado, muitas características do produto já foram definidas. Nesta etapa é possível usar, como recomenda a norma americana MIL-STD 1629A (1980), tanto a abordagem funcional quanto estrutural.

Iniciar o FMEA na fase de projeto não garante que todas as falhas dos processos seguintes do desenvolvimento do produto serão evitadas. Segundo SOUZA (2000), devido à complexidade e dificuldade de prever as falhas, algumas podem ocorrer em campo. Conseqüentemente, o *feed back* de campo também é uma das etapas muito importantes em um programa de confiabilidade. LATINO (1996) propõe uma abordagem modificada de FMEA, em sua obra é possível perceber a importância dos históricos do produto colhidos durante a fase do uso, resultando em reduções no tempo gasto para o desenvolvimento do FMEA, redução do número de pessoas envolvidas e dos custos.

4.9 Aplicações do FMEA/FMECA

A literatura tem trazido exemplos de aplicação do FMEA em diferentes setores. Estes exemplos e recomendações não são consensuais. Neste texto será apresentada uma discussão geral sobre estas aplicações.

Estão presentes na literatura aplicações em sistema, projeto, processo e serviço. Esta é a classificação de STAMATIS (1995) e o autor entende que:

FMEA de Sistema – É usado para analisar sistemas e subsistemas nas fases iniciais de concepção e projeto. O FMEA de sistema enfoca os modos potenciais de falha entre as funções do sistema, causada por algumas deficiências do sistema. Ele inclui a interação entre os sistemas e os elementos do sistema.

FMEA de Projeto – É usado para analisar produtos antes que eles sejam liberados para a manufatura. O FMEA de projeto enfoca os modos potenciais de falha causados pelas deficiências do projeto.

FMEA de Processo – É usado para analisar os processos de manufatura e montagem. O FMEA de processo enfoca os modos de falhas causados pelas deficiências do processo ou montagem.

FMEA de Serviço – É usado para analisar serviços antes que eles alcancem o cliente. O FMEA de serviço enfoca os modos de falha (tarefas, erros, enganos) causados pelas deficiências do sistema ou processo.

As interações entre as aplicações podem ser vistas na Figura 4.7.

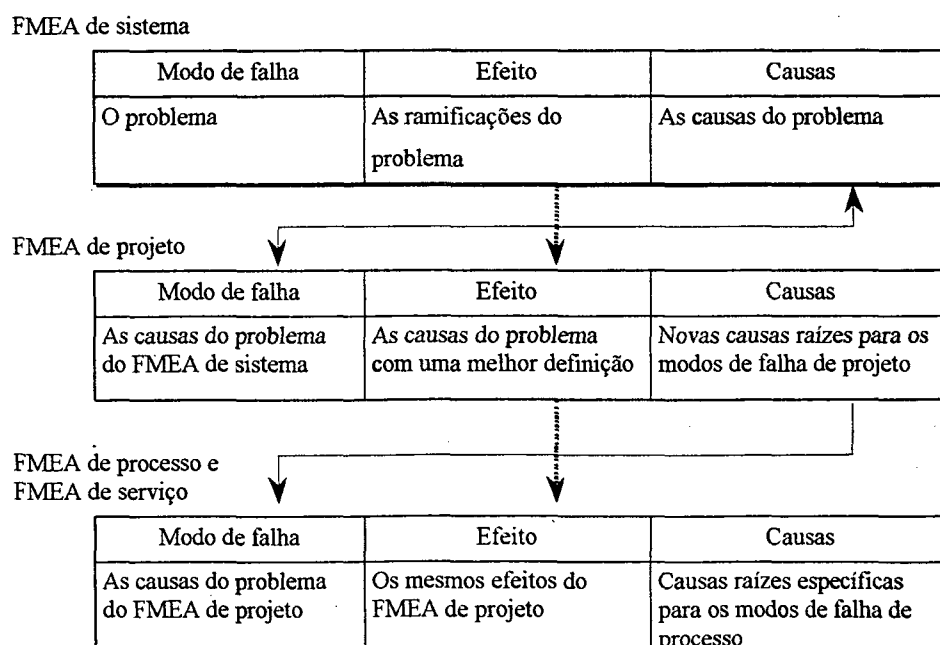


Figura 4.7 – Relacionamento entre os vários tipos de FMEAs (STAMATIS, 1995).

STAMATIS (1995) explica que os modos de falha do FMEA de sistema geram todas as informações essenciais para os FMEAs de projeto e processo, e embora os efeitos permaneçam os mesmos, as causas no FMEA de sistema tornam-se os modos de falhas no projeto, no qual geram suas próprias causas, que finalmente tornam-se os modos de falha no FMEA de processo.

A explicação não é clara, principalmente, no que se relaciona às causas que vão passando a ser modos de falha. O fato dos efeitos permanecerem os mesmos, leva a concluir que a análise está sendo feita considerando sempre o mesmo usuário, ou seja, o usuário final do produto, o cliente externo.

O guia desenvolvido pela *Ford Motor Company* (1997), apresenta apenas três áreas principais para as aplicações: Conceito, Projeto, Processo. O FMEA de Conceito apresenta-se semelhante ao FMEA de sistema de STAMATIS (1995), o qual é empregado para analisar as concepções de sistemas e subsistemas, nas fases iniciais de projeto. Essa aplicação focaliza os modos de falha potenciais associados às funções propostas, de um conceito adotado, pelas decisões de projeto. As definições de FMEA de projeto e processo também são semelhantes às definições adotadas por STAMATIS (1995).

Na Figura 4.8 são apresentadas as dez categorias de FMEA utilizadas pela Ford: Uma aplicação de conceito, três de projeto, três de montagem e três de manufatura.

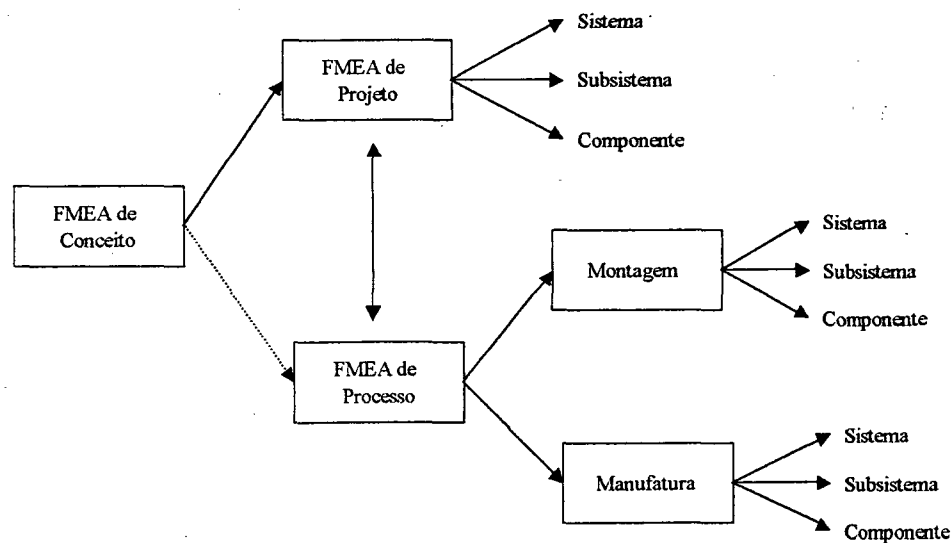


Figura 4.8 – Categorias de FMEA (FORD, 1997).

4.10 A equipe participante do FMEA/FMECA

Alguns autores como KUME [1996], STAMATIS (1995), VILLACOURT (1992) dizem que um FMEA deve ser desenvolvido por uma equipe. No entanto, PALADY (1997) diz que um FMEA pode e tem sido executado como um esforço individual, mas concorda que é mais eficiente quando aplicada em um esforço de equipe. Pode se afirmar que é preciso ter uma liderança e profissionais de área específica e correlata ao tema em análise requerendo do grupo objetividade e sinergia para atingir os objetivos propostos.

Não há uma regra para definir o número de participantes do FMEA. PALADY (1997) sugere um número de cinco a sete participantes, já STAMATIS (1995) diz que o número deve variar de cinco a nove pessoas, mas cinco é um bom número. O que se pode observar nas equipes é que os engenheiros de projeto e processo quase sempre devem estar presentes nas equipes.

PALADY (1997) recomenda que uma pessoa deve ser responsável pela duração do FMEA, pelo orçamento e pela eficácia do FMEA, enquanto que a equipe deve ser responsável em desenvolver a FMEA. O procedimento FMEA apresentado pela Ford tem um ponto de vista semelhante ao de PALADY (1997) e concordam que embora a preparação do FMEA seja designada a um indivíduo, a contribuição do FMEA deve ser um esforço de equipe.

A equipe deve estar selecionada pelas áreas envolvidas de modo que cada membro contribua com diferentes experiências e conhecimentos. A equipe define os pontos e problemas, identifica e propõe idéias, fornece e recomenda análises ou técnicas apropriadas, e toma uma decisão baseada num consenso, que é uma decisão coletiva alcançada através da participação ativa de todos os membros.

STAMATIS (1995) salienta que não é necessário que haja concordância das idéias em 100 por cento, mas todos os membros devem estar comprometidos com a decisão.

Tanto STAMATIS (1995) como PALADY (1997) concordam que não se deve usar como regra a decisão da maioria, pois isto não garante que esteja correta. Pode-se afirmar que os princípios democráticos são válidos para o relacionamento entre os membros da equipe, mas a decisão final deverá ser de consenso.

Para alcançar um consenso, cada membro do time deve estar disposto a:

- Receber idéias;
- Ter uma postura para contribuir e não defender;
- Ouvir ativamente os outros pontos de vista;
- Verificar e descobrir as razões das outras opiniões;

- Confrontar com as diferenças de maneira não agressiva;

Estes itens foram apresentados por STAMATIS (1995) e se assemelham bastante com as regras usadas no *Brainstorming*. Afinal, uma equipe de *Brainstorming* também é composta por pessoas de vários setores, que exercem diferentes funções e estão reunidas com um objetivo em comum. No anexo 3 são apresentadas algumas equipes FMEA sugeridas por STAMATIS (1995) e PALADY (1997).

A eficiência e a produtividade do FMEA pode ficar comprometido quando (STAMATIS, 1995):

- O propósito da reunião não estiver claro;
- A reunião for mantida apenas para “cumprir tabela”;
- Houver repetição de informações antigas;
- Forem tratados assuntos muito enfadonhos; assuntos triviais;
- O líder reprime o time;
- A equipe for constituída de membros despreparados;
- As tarefas forem definidas superficialmente;
- Existir pouco tempo ou vontade para tratar com situações inesperadas;

Quando a equipe continua a se reunir sem a verificação dos itens acima, erros ocorrem, como por exemplo:

- Erros causados por mal entendimento;
- Descoberta da necessidade de buscar informações adicionais;
- Dados incompletos porque o formulário é muito difícil de se completar;
- Falha no uso de dados existentes;

STAMATIS (1995) salienta que todos os membros da equipe devem ter algum conhecimento do comportamento do grupo, das tarefas, dos problemas a serem discutidos, das pessoas relacionadas direta ou indiretamente com o problema. Acima de tudo, eles devem estar dispostos a contribuir.

Uma equipe é um grupo de indivíduos que estão comprometidos em alcançar objetivos organizacionais em comum, que se encontram regularmente para identificar e resolver problemas, que buscam melhorar os processos, que trabalham juntos de maneira eficaz e interagem abertamente. As equipes multidisciplinares podem e devem fazer uso de ferramentas como, FTA, *Brainstorming* e QFD.

Na equipe é necessário que haja um coordenador que tenha conhecimento a respeito de FMEA para orientar as reuniões. Os membros da equipe são escolhidos em função do problema,

pois cada produto possui características particulares como função, projeto, materiais, fabricação, qualidade. É muito importante que os membros participantes tenham conhecimento das definições utilizadas no FMEA e também conhecimento do produto na respectiva área.

4.11 Procedimento geral para a execução do FMEA/FMECA

Os procedimentos descritos pelos autores são baseados na experiência de cada um. Estes procedimentos foram agrupados no Quadro 4.6. sendo possível verificar que as seqüências de algumas etapas são coincidentes e existe pouca variação entre um procedimento e outro. As etapas descritas são referentes ao FMECA. Para o FMEA, como foi discutido anteriormente, não existem as etapas referentes à avaliação da criticalidade (NPR).

Quadro 4.6 – Procedimentos para o desenvolvimento do FMECA.

Etapa	TENG e HO (1996)	KUME [1996]	VILLACOURT (1992)	STAMATIS (1995)
1	Coleta de informações do componente e função do processo	Modos de Falha	Revisar as especificações e documentos de requerimentos do sistema	Selecionar a equipe e <i>Brainstorming</i>
2	Modos de falha	Efeitos	Coletar as informações	Diagrama Funcional de Blocos e ou Fluxograma do processo
3	Efeitos	Causas e Mecanismos das falhas	Diagrama Funcional de Blocos	Organizar os problemas por prioridade
4	Causas	Ocorrência	Modos de falha	Modos de falha
5	Controles atuais	Severidade	Efeitos	Efeitos
6	NPR (Número de prioridade de risco)	Deteção	Causas	Controles existentes
7	Ações Corretivas	NPR (Número de prioridade de risco)	Controles atuais, deteção das falhas.	Severidade, ocorrência, deteção.
8		Ações Corretivas, Melhorias recomendadas.	NPR (Número de prioridade de risco)	NPR (Número de prioridade de risco)
9		Distribuição de tarefas e prazo	Preparação dos formulários	Confirmar, Avaliar e mensurar a situação.
10		Reavaliar o NPR.	Revisão (Priorizar problemas)	Refazer todos os passos acima novamente
11			Ações corretivas	

Estudando as experiências transmitidas pelos autores STAMATIS (1995), VILLACOURT (1992), KUME [1996], PALADY (1997), FORD (1997), sentiu-se necessidade de aproximar o conhecimento apresentado, ao que se entende ser necessário aplicar, quando se vai iniciar um processo de FMEA/FMECA. Estas proposições são resultados das discussões feitas com os participantes dos processos de FMEA que serão apresentados no capítulo 5.

1. Escolha dos membros da equipe

Um dispositivo para desempenhar qualquer função, por mais simples que seja, requer itens caracterizados por: funções, materiais, acabamentos, tolerâncias e qualidade. A aplicação do FMEA a um desses itens, em qualquer fase do ciclo de vida, vai exigir diversidade, qualidade e profundidade de informações. Este grau de exigência só poderá ser suprido quando se dispõe de uma equipe de trabalho com especialistas das diversas áreas relacionadas comprometidos com o método e com o produto em análise.

No quadro 4.6 foi apontado ser obrigatório pelo menos a presença de um responsável pelo projeto e pelo sistema. Na experiência vivida percebeu-se que é preciso ter um responsável pelo projeto ou sistema que vai preparar os aspectos relacionados com o projeto, como modelo físico, modelo confiabilísticos, diagramas, fotografias, e vai implementar as decisões das reuniões. E também é necessário ter um líder de FMEA, ou especialista em FMEA para dirimir as dúvidas conceituais relativas ao que é modo de falha, efeito, função, causa, FMEA de componente, FMEA de sistema, além de organizar e registrar as informações nos formulários.

2. Definição do sistema e dos componentes

O sistema é definido nesta etapa e é feita a lista dos componentes que constituem o sistema. Um componente não precisa ser necessariamente uma peça do equipamento. Quando existirem muitos componentes, deve-se racionalizar a análise e procurar buscar os componentes que ao falharem podem comprometer a função, a segurança, a ergonomia, bem como aqueles que tem a taxa de falha mais elevada, componentes novos, componentes que sofreram manutenção, enfim deve-se analisar os pontos que sofreram mudanças.

Um subsistema também pode ser considerado como componente. Dependendo da complexidade do sistema agrupam-se os componentes em subsistemas tratando-os como um componente único. A definição do sistema e dos componentes é muito importante para a aplicação das definições dos modos de falha e dos efeitos. Os modos de falha estão associados

aos componentes, enquanto que os efeitos estão associados ao sistema. A preparação deste contexto pode ser feita pelo líder do projeto e pelo líder de FMEA.

3. Diagrama funcional de blocos, fluxogramas, modelos confiabilísticos

Os diagramas funcionais de blocos, fluxogramas ou modelos confiabilísticos são utilizados para mostrar como as diferentes partes do sistema interagem umas com as outras, facilitando a verificação dos caminhos críticos e o entendimento do sistema.

Os Diagrama funcional de blocos e fluxogramas são facilitam a análise dos sistemas, permitindo uma melhor visualização do problema. São etapas que aparecem formalmente nos procedimentos descritos por VILLACOURT (1992) e STAMATIS (1995), sendo que o último sugere o uso do diagrama funcional de blocos para os FMEAs de sistema e projeto e o fluxograma para o FMEA de processo.

É possível desenvolver o FMEA sem o auxílio dos diagramas, mas a análise do sistema se torna muito mais difícil e a chance de se esquecer de algum detalhe se tornam maior. Nesta fase, a participação de um especialista em confiabilidade e na ferramenta auxiliar de análise utilizada, torna-se recomendável.

4. Funções dos componentes

A descrição da função deve ser exata e concisa. As funções são muito importantes porque são uma grande referência para os modos de falha, especialmente quando se está utilizando a abordagem funcional. A descrição da função deve ser preparada pelo projetista e colocada em discussão para todos os membros do processo de análise de FMEA.

5. Modos de falha de cada componente

Modo de falha é um estado anormal de trabalho, uma anomalia apresentada pelo item que está sendo analisado.

Os componentes constituintes do sistema são analisados, sendo levantados todos os seus respectivos modos de falha. Deve-se perguntar quais as possíveis maneiras do componente em estudo se apresentar defeituoso? Como ele pode deixar de executar a sua função para o qual foi projetado?

A análise deve ser feita levando-se em consideração a função do componente e as especificações de projeto. Se existe um modo de falha, deve-se leva-lo em consideração, pelo menos no início do processo.

Se o modo de falha for tecnicamente possível de ocorrer, ele deve ser levado em consideração. A Figura 4.9 é usada para mostrar que a análise dos modos de falha é uma ação interna ao sistema, em última análise, está relacionado com o componente.

Nesta etapa, geralmente ocorrem discussões a respeito da classificação da falha. Vale ressaltar aqui que, nem sempre é possível classificar uma falha como modo de falha, causa ou efeito. Uma forma de

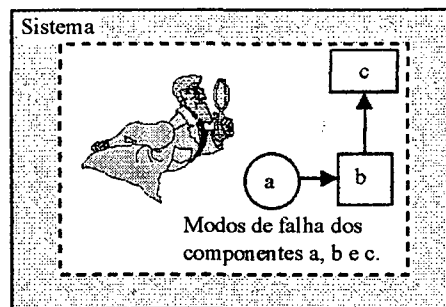


Figura 4.9 – Indicativo de que a análise dos modos de falha é uma ação interna ao sistema.

6. Efeitos causados no sistema

O estudo e a identificação dos efeitos é fundamental tanto para o projetista quanto para quem trabalha com processo. É um requisito fundamental para incorporar aos itens conceitos de manutenibilidade e processos de manutenção como manutenção centrada na confiabilidade e manutenção centrada na produtividade. Uma vez que se tem clareza de como os modos de falha se manifestam, pode-se projetar sensores para captar estas informações. Estes sensores vão anunciar quando se está iniciando um processo de falha, o que permitirá programar as ações corretivas. A análise dos efeitos requer aprofundar o conhecimento e a percepção sobre o sistema de um ponto de vista mais externo. Aqui interessa saber as informações que o sistema está emitindo.

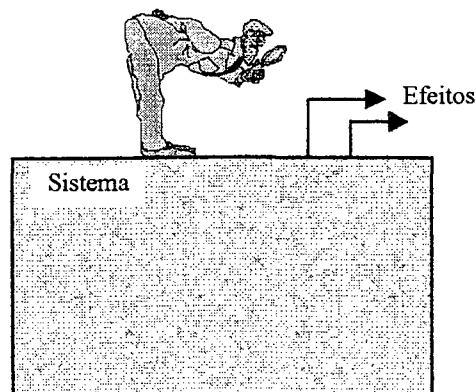


Figura 4.10 – Indicativo de que a pesquisa dos efeitos dos modos de falha é uma ação externa ao sistema.

É muito importante que se tenha à disposição uma lista de funções do sistema para auxiliar o desenvolvimento da listas de efeitos que podem ocorrer. Os efeitos dos modos de falha ocorrem ao nível de sistema e refletem sobre o cliente (externo ou interno). Quando chega a este ponto, ainda dentro do período de vida útil, tem-se um problema, cuja solução sempre é custosa, como visto na figura 4.6.

7. Avaliação dos efeitos e análise das causas dos modos de falha

Para a avaliação dos efeitos são usadas algumas escalas para estimar o impacto com relação à segurança do cliente, meio ambiente, normas governamentais, imagem da empresa ou custos. As escalas utilizadas para a avaliação não são precisa, variando com o autor, análise, tipo de produto, empresa. O Quadro 4.4 e Quadro 4.7 são exemplos de escalas de severidade utilizadas para a avaliação.

Quadro 4.7 – Categorias ou riscos para avaliar a gravidade da falha (DE CICCIO e FANTAZZINI, 1988).

Classificação	Tipo	Observação
I	Desprezível	A falha não irá resultar numa degradação do sistema, nem irá produzir danos funcionais ou contribuir com o risco ao sistema.
II	Marginal (ou limítrofe)	A falha irá degradar o sistema numa certa extensão, porém, sem envolver danos maiores, podendo ser compensada ou controlada adequadamente.
III	Crítica	A falha irá degradar o sistema causando danos substanciais, ou irá resultar num risco inaceitável, necessitando ações corretivas imediatas.
IV	Catastrófica	A falha irá produzir severa degradação do sistema, resultando em sua perda total.

São verificados os modos de falha relacionados com os efeitos que obtiveram uma classificação elevada e então se inicia o trabalho de levantamento das causas destes modos de falha. Neste contexto e para esta atividade a equipe de FMEA deve estar o mais completa possível.

8. Revisão do formulário e seleção das ações principais.

O processo de revisão deve iniciar a partir dos registros, inicialmente, estabelecidos. Evidentemente para ser deflagrado um processo de FMEA necessidades, requisitos e metas foram estabelecidas. Então o processo de revisão deve incorporar todos estes parâmetros.

Nesta etapa também são definidas as ações de melhoria, data de implementação e os responsáveis pelas ações. PALADY (1997) salienta que as ações de melhorias recomendadas devem resultar em benefícios de qualidade e confiabilidade.

Recomenda-se que a equipe utilize técnicas de solução de problemas em suas revisões, como por exemplo, *Brainstorming*, diagramas de pareto as quais são muito eficazes e úteis. Neste contexto os formulários devem estar preenchidos, principalmente, naqueles contextos para o qual a reunião foi convocada. A ação de FMEA é um exercício de conhecimento constante e por isso precisa ser executado por etapas.

4.12 Resultados e benefícios obtidos com o FMEA/FMECA

O Quadro 4.8 foi gerado a partir da informações colhidas da obra de STAMATIS (1995). A proposta é apresentar uma síntese resumida do conceito geral do FMEA proposto pelo autor.

Quadro 4.8 – Resultados e benefícios obtidos com o FMECA.

	Sistema	Projeto	Processo	Serviço
Resultado do FMEA	Lista dos modos de falhas potenciais, organizados pelo número de prioridade de risco (NPR).			
	Lista das funções dos sistemas que poderiam detectar os modos de falha potenciais.	Lista das características críticas e/ou significativas.		Lista de tarefas ou processos críticos ou processos.
		Lista de ações recomendadas para as características críticas e/ou significativas.	Lista para eliminar as causas dos modos de falha, reduzir sua ocorrência e melhorar a detecção de defeito se o índice Cpk não poder ser melhorado.	Listas dos processos e tarefas que são "gargalos".
	Lista de parâmetros para testes apropriados, inspeções e métodos de detecção.	Lista para eliminar os erros.		
Lista para ações de projeto para eliminar os modos de falha, problemas de segurança e reduzir a ocorrência.			Lista para monitorar as funções dos sistemas/processos.	

	Sistema	Projeto	Processo	Serviço
Os benefícios de se utilizar um FMEA	Ajuda a selecionar a melhor alternativa de projeto de sistema.	Estabelece uma prioridade de ações de melhoria de projeto.	Identifica as deficiências no processo e oferece um plano de ações corretivas.	Auxilia nas análises dos fluxos de trabalho.
	Ajuda a determinar redundância.	Fornecer informações para ajudar através da verificação do projeto do produto e testes	Identifica as características críticas e/ou significativas e ajuda o desenvolvimento dos planos de controle.	Auxilia nas análises dos sistemas e/ou processos. Identifica as deficiências das tarefas.
	Ajuda na definição da base para os procedimentos de diagnóstico em nível de sistema.	Ajuda a identificar as características críticas ou significativas.	Estabelece uma prioridade de ações corretivas.	Identifica as tarefas críticas ou significativas e ajuda no desenvolvimento dos planos de controle.
	Aumenta a probabilidade de que os problemas potenciais sejam considerados.	Auxilia na avaliação dos requerimentos de projeto e alternativas.	Auxilia na análise dos processos de manufatura e montagem.	Estabelece uma prioridade para as ações de melhoria.
	Identificam as falhas potenciais do sistema e sua interação com outros sistemas ou subsistemas.	Ajuda a identificar e eliminar os problemas potenciais de segurança.		
		Ajuda a identificar antecipadamente as falhas, nas fases de desenvolvimento do produto.		
		Documenta as razões para as mudanças.		

4.13 Comentários

Com o estudo de FMEA/FMECA foi possível constatar que:

O procedimento para a aplicação no projeto ou no processo de fabricação é o mesmo.

Quase sempre haverá a presença do engenheiro de projeto ou processo porque é necessário que se conheça bem o sistema em análise.

As informações mais importantes para a execução do FMEA são: desenhos, protótipos, descrição das funções (componentes, sistema), especificações de projeto e processo, diagramas de blocos (fluxogramas, modelos confiabilísticos).

As particularidades relacionadas aos processos FMEA/FMECA como mostram as figuras 4.3, 4.4 e 4.5, estão relacionadas aos índices que caracterizam o número de prioridade de risco (NPR). Embora esteja disponível na literatura e em normas, os escores que definem as métricas associadas aos índices podem ser redefinidos pela equipe que faz a execução do FMEA/FMECA.

A opção de se aplicar um FMECA ao invés de FMEA está centrada, em controlar a severidade e a probabilidade de ocorrência. Esta necessidade está mais fortemente presente nos itens reparáveis e em sistemas de produção contínua ou que envolvam riscos de acidentes. Em itens não reparáveis, nos casos em que é desejável e suficiente ter a confiabilidade e a manutenibilidade como referências, o FMEA é recomendável.

Capítulo 5

Aplicação do FMEA e FTA na análise e desenvolvimento de produtos

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados dois estudos de caso relacionados ao uso do FMEA: uma aplicação sobre um componente hidráulico, a bomba de engrenagens, e uma aplicação no projeto de uma transplantadora de mudas na fase do projeto detalhado. Um terceiro estudo de caso é apresentado utilizando o FTA com o objetivo de facilitar a comunicação entre o engenheiro do conhecimento e o especialista.

Durante os estudos de caso, são realizadas descrições das etapas iniciais do procedimento para a execução do FMEA as quais são fundamentais: Identificação e classificação dos modos de falhas, efeitos e as causas associadas.

Essas etapas são descritas por vários autores e são bastante similares como foi visto no Capítulo 4. No entanto, existem algumas considerações que merecem destaque, pois não estão apresentadas de forma clara na bibliografia encontrada.

5.2 *Análise dos modos de falhas e seus efeitos na bomba de engrenagens externas*

A bomba de engrenagens externas é um componente amplamente utilizado em sistemas hidráulicos, e tem como função converter energia mecânica (recebida do motor) em energia hidráulica, Figura 5.1. A bomba fornece uma determinada vazão devido ao constante engrenamento de duas ou mais rodas dentadas, sendo a bomba também denominada de "Bomba de Deslocamento Positivo".

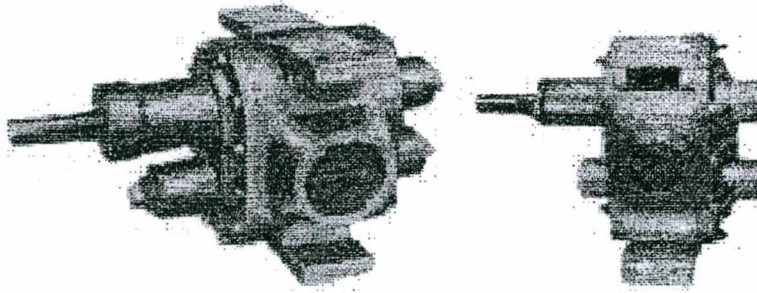


Figura 5.1 – Bomba de engrenagens (Calctec Engenharia Ltda, 2001).

A Figura 5.2 mostra o funcionamento típico de uma bomba de engrenagens. As duas engrenagens estão alojadas em uma carcaça sendo que uma delas (engrenagem motriz), tem o eixo passante que transmite a potência fornecida pelo motor. A outra engrenagem que efetua o engrenamento é chamada de conduzida ou acionada. O constante desengrenamento dos dentes cria uma descompressão na câmara de sucção, fazendo com que o fluido seja succionado do reservatório. O fluido é conduzido perifericamente pelos vãos das rodas que formam uma câmara fechada com a carcaça da bomba e vedações laterais. O engrenamento constante expulsa o fluido dos vãos e o força para fora da bomba.

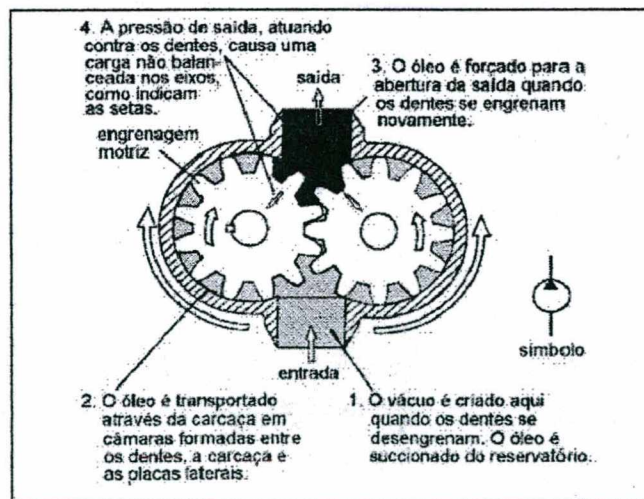


Figura 5.2 – Bomba de engrenagens (TELECURSO 2000, 2001).

A opção em fazer-se o estudo de FMEA em bombas de engrenagens, foi devido ao fato deste equipamento fazer parte de um circuito hidráulico que está sendo analisado num tema de pesquisa associado à confiabilidade, manutenibilidade e sistema especialista (VINADÉ, 2000).

A equipe FMEA foi inicialmente formada por membros do laboratório UFSC/EMC/NeDIP¹, sendo que nenhum dos membros da equipe teve experiência anterior na área de sistemas hidráulicos. Nas reuniões de definição da estratégia para o estudo de FMEA em bombas e circuitos, houve a participação de um professor². O conhecimento inicial da equipe basicamente era de origem acadêmica, oriundo das disciplinas oferecidas no curso de engenharia mecânica. Um estudo para aquisição do conhecimento foi feito, sendo consultados catálogos, apostilas e livros a respeito da bomba de engrenagens, dado que para o desenvolvimento do FMEA é necessário que os membros da equipe tenham conhecimento do sistema. Paralelamente, foram apresentadas as etapas iniciais de um procedimento para o desenvolvimento do FMEA:

1. Seleção dos componentes e descrição das funções.
2. Identificação dos modos de falha de cada componente e efeitos no sistema.
3. Identificação das causas dos modos de falha.

Existem duas formas de se analisar a bomba de engrenagens: A primeira análise a ser feita seria considerar a bomba de engrenagens enquanto um sistema. Uma segunda análise seria considerá-la um componente de um sistema hidráulico.

O objetivo da primeira análise é solidificar o conhecimento a respeito do que é modo de falha e o que é efeito para a bomba de engrenagens. Tendo estas definições bem fundamentadas, a aplicação destas para os outros componentes hidráulicos se dará de uma forma mais simples. Posteriormente, esta análise será comparada à bomba de engrenagens quando considerada como um componente de um sistema hidráulico.

Com o decorrer das reuniões, percebeu-se a importância de se especificar explicitamente se a bomba de engrenagens era um sistema ou um componente de um sistema hidráulico. Se for considerada como um sistema, a bomba de engrenagens deve ser analisada isoladamente, sem considerar os elementos vizinhos e o meio, tendo como componentes: eixos, mancais, engrenagens, estator, tampas laterais. Se a bomba de engrenagens for considerada como um componente de um sistema hidráulico, esta será analisada como uma “caixa-preta”. Para este nível de análise não são considerados os seus componentes internos.

Na análise da bomba enquanto um sistema, foi estudado os modos de falha de cada um dos componentes que constituem a bomba: eixos, mancais, engrenagens, etc. Os efeitos relativos aos modos de falha, nestes casos, vão se manifestar na bomba.

¹ Um doutorando, um mestrando e uma bolsista de iniciação científica.

² Dr. Eng. Mecânica, Professor da UFSC/EMC/NeDIP.

Na análise da bomba enquanto componente, os modos de falhas referentes à bomba (vazamento, vibração, ruído) tem seus efeitos repercutindo sobre o circuito hidráulico em que estiver operando.

5.2.1 Análise da bomba de engrenagens como um sistema

A bomba de engrenagens quando analisada como um sistema, deve ser observada como um sistema isolado. Não se deve levar em consideração outros componentes do sistema hidráulico ou a canalização. O procedimento segue as etapas 1, 2 e 3 apresentadas anteriormente.

5.2.1.1 Seleção dos componentes e descrição das funções

A vantagem de se aplicar o FMEA, a um produto que já está em uso, ou seja, em circulação no mercado é a disponibilidade de informações. Com base nas informações dos fabricantes (REXROTH, 1987; BOSCH, 1991), foi possível identificar os componentes mais suscetíveis às falhas: Eixos, mancais, engrenagens (dentes), estator (carcaça), tampas (vedação lateral). A grande dificuldade em uma análise nesse nível é definir as funções dos componentes do sistema.

O objetivo da descrição das funções é vincular o modo de falha à função e também obter um maior conhecimento dos componentes e do sistema. Embora a bomba de engrenagens seja um componente já em uso, as funções dos componentes não estão descritas nos documentos do fabricante. Isso porque a função de cada componente é definida no projeto conceitual. Esta informação não é repassada para os catálogos do produto. Por causa disso, coube à equipe executar a tarefa de recuperar as funções dos componentes.

A função de uma bomba de engrenagens é bem definida: transmitir uma vazão a uma dada pressão. Já a função das engrenagens da bomba seria conduzir o óleo da zona de baixa pressão para a zona de alta pressão. Mas isto exige a participação de outros componentes, pois esta função não poderia ser executada perfeitamente, caso haja falha nos outros componentes como, por exemplo, na tampa ou no estator. Por causa disso torna-se muito difícil fazer esta relação item-função, tendo em vista que uma função quase sempre está vinculada a vários itens. A lista das funções dos componentes está apresentada no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Lista dos componentes e suas funções.

Componente	Função
Eixos	Transmitir torque, rotação e suportar as engrenagens.
Mancais	Dar suporte aos eixos
Engrenagens (dentes)	Conduzir o fluido
Tampas (Vedação lateral)	Auxiliar na condução do fluido, Vedar
Estator (Carcaça)	Auxiliar na condução do fluido, vedar, dar suporte aos mancais.

5.2.1.2 Identificação dos modos de falha de cada componente e os efeitos da bomba de engrenagens.

Neste caso, a identificação das funções não trouxe informações eficazes que auxiliassem na identificação dos modos de falha, desta forma, para este caso, foi decidido **não só relacionar** o modo de falha às funções dos componentes, mas também às especificações de projeto e fabricação, e aos aspectos de resistência (ruptura, deformação, desgaste, etc). A falha também pode ser descrita como um defeito no componente que pode ter sua origem no desenvolvimento (projeto, fabricação) ou no uso (sobrecarga ou envelhecimento) do produto. O Quadro 5.2 apresenta os componentes e os respectivos modos de falha.

Nesta etapa do desenvolvimento surgiram alguns questionamentos do tipo:

- Ruído é um modo de falha?
- Cavitação é modo de falha?

Ruído foi considerado como efeito porque é um evento que pode ser percebido externamente a bomba. Pode-se perguntar, uma bomba pode ter ruído e estar executando a sua função? Neste caso, é uma falha? Muitos autores caracterizam o modo de falha baseando-se apenas no cumprimento da função. Dependendo da aplicação do produto, embora este esteja executando a sua função, o ruído elevado poderá ser interpretado pelo cliente como uma falta de qualidade, conseqüentemente a aceitação no mercado poderá ficar comprometida.

Esse problema evidenciou que a definição de alguns termos ainda não estava adequada. Sendo assim, no Capítulo 4, na definição de modo de falha foi adicionada a especificação (projeto, fabricação ou uso) como um parâmetro para verificar se o item está, ou não, em falha. Se na especificação do projeto estiver definido um limite para o ruído (dB), então este será usado

para verificar se o item está em falha. Neste caso, para este limite, ruído é um modo de falha e o seu efeito será percebido por sensores projetados para isso.

Com relação à cavitação, com certeza não é um efeito, porque a cavitação é um fenômeno que ocorre dentro da bomba. Mas então, é um modo de falha?

Foi decidido pela equipe que a cavitação não é um modo de falha, e sim a causa de um modo de falha. A cavitação é um fenômeno que se manifesta, alterando o acabamento superficial, como se fosse uma corrosão no estator e tem um ruído bem característico. O importante é que a cavitação está sendo considerada indiretamente, quando se inclui a falha “estator corroído” na lista dos modos de falha. Uma das causas da alteração do acabamento superficial e desgaste no estator é a cavitação, e esta se manifesta deixando marcas bem característica que podem ser identificadas através de uma análise visual.

Quadro 5.2 – Os componentes da bomba e seus modos de falhas.

Componentes	Modos de falha
Eixo	Deformado
	Desalinhado
	Empenado
	Rompido
Mancal	Desgastado
	Deformado
Engrenagem (dente)	Desgastado
	Rompido
Estator	Desgastado / Corroído
Tampas laterais	Desgastadas

Durante os debates nas reuniões de FMEA foi possível perceber que um evento pode ser modo de falha ou não, dependendo do que o grupo entende sobre os fenômenos associados ao item que está sendo estudado. Por isso, é importante aprofundar o estudo sobre o equipamento em análise, definir claramente o motivo para o qual está sendo feito o FMEA, e finalmente saber sobre os aspectos técnicos do FMEA. Infelizmente, a definição de modo de falha não consegue se ajustar adequadamente a todos os casos.

Por exemplo: Fadiga é um modo de falha de um eixo?

Para uma equipe de pesquisa que trabalhe com análises de estruturas, pode ser considerado como modo de falha. No entanto, para os operadores de uma máquina o modo de falha é “rompido”, e pouco importa se foi por ruptura estática, fadiga a baixo ciclo, fadiga a alto ciclo, falha de micro-estrutura, etc.

Então cabe ao grupo decidir se o evento de falha será, ou não, um modo de falha. O importante é ter consciência da possibilidade do evento de falha ocorrer, independente dele ser intitulado como modo de falha, causa ou efeito.

Nesta aplicação da bomba de engrenagens foi possível constatar que efeitos podem gerar outros efeitos. Por exemplo: A “Vibração” é um efeito e pode gerar “vazamento externo” que é um outro efeito. Isto mostra que nem sempre o encadeamento de eventos segue a estrutura: causas – modos de falha – efeitos. Pode-se então, concluir que modos de falhas podem gerar outros modos de falha e efeitos podem gerar outros efeitos.

Os debates para classificação das falhas, como modos de falhas ou efeitos, fizeram com que não houvesse uma distinção das etapas “Identificação dos modos de falha dos componentes” e “Identificação dos efeitos do sistema”. Estas etapas foram desenvolvidas paralelamente. O Quadro 5.3 traz a lista de modos de falha e efeitos pesquisados.

Quadro 5.3 – Componentes, modos de falha e seus efeitos.

Componentes	Modos de falha	Efeitos
Eixo	Deformado	Vazamento externo
	Desalinhado	Vibração
	Empenado	Vazão incorreta
	Rompido	Ruído
Mancal	Desgastado	Não tem vazão
	Deformado	Vazamento externo
Engrenagem (dente)	Desgastado	Vibração
	Rompido	Vazão incorreta
Estator	Desgastado / Corroído	Ruído
		Vazão incorreta
Tampas laterais	Desgastado	Diminui pressão
		Interrompe a vazão
		Vazão incorreta
		Vibração
		Diminui a pressão de projeto
		Aumento de temperatura
		Ruído (Se houver cavitação)

5.2.1.3 Identificação das causas dos modos de falha

Somente após ter pesquisado a respeito dos modos de falha e seus efeitos, inicia-se o processo de identificação das causas dos modos de falhas. As causas dos modos de falha foram identificadas e agrupadas no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Componentes, modos de falha e causas.

Componentes	Modos de falha	Causas dos modos de falha
Eixo	Deformado	Erro de fabricação, erro de projeto, carregamento acima da resistência de escoamento.
	Desalinhado	Erro de fabricação, erros de montagem, erro de projeto.
	Empenado	Erro de fabricação, carregamento acima da resistência de escoamento, erro de projeto.
	Rompido	Erro de fabricação, carregamento acima da resistência de ruptura, erro de projeto
Mancal	Desgastado	Falha de lubrificação, uso excessivo, erro de fabricação, montagem ou de projeto.
	Deformado	
Engrenagem (dente)	Desgastado	Falha na fabricação, nível excessivo de contaminantes no fluido, erros de montagem ou de projeto do eixo, uso excessivo, pressão excessiva.
	Rompido	
Estator	Desgastado / Corroído	Nível excessivo de contaminantes no fluido, uso excessivo, pressão excessiva, efeitos do eixo desalinhado.
Tampas laterais	Desgastado	Nível excessivo de contaminantes no fluido, uso excessivo, pressão excessiva, efeitos do eixo desalinhado.

5.2.1.4 Resultados obtidos e Comentários

Através dessa análise foi possível perceber que para um modo de falha, várias causas podem existir, da mesma maneira que um efeito, pode ser gerado por vários modos de falha. Por causa dessas várias possibilidades, a análise simples e direta dos formulários FMEA não permite visualizar os mecanismos que conduziram a falha claramente. Aqui o uso do FTA, pode facilitar a visualização dos eventos. A Figura 5.3 apresenta a análise da bomba de engrenagem visando complementar as informações do FMEA. Identificando um efeito, por exemplo vibração, associou-se a partir dos quadros de FMEA, os modos de falha que podem gerar vibrações. Trabalhou-se com a porta lógica “ou”, mas alguns modos de falha podem estar associados ao efeito de maneira conjunta, ou seja, os modos de falha são eventos independentes, e não-mutuamente exclusivos.

Com certeza o modo de falha vibração, pode ter frequência e amplitude distintas para cada uma das situações. Várias combinações podem ocorrer.

Neste exemplo é possível perceber a importância de se utilizar os símbolos representados por triângulos, *transfer-in* e *transfer-out*, Quadro 3.10. Como existem muitos eventos que conduzem ao mesmo modo de falha, o uso dos símbolos permite que o diagrama não fique

carregado de informações repetidas, permitindo visualizar rapidamente as causas que conduzem a um mesmo modo de falha. O triângulo quando conectado ao lado de uma porta lógica, está informando que todos os eventos que estão conectados abaixo dessa porta lógica se repetirão em outro ponto da árvore de falhas. Por causa disso, os triângulos recebem um número que serve como indexador, indicando a porta lógica que está sendo referenciada. Logo, como pode ser observado na figura, as causas do modo de falha “eixo desalinhado” e “mancal deformado” são as mesmas, triângulo (3).

Os eventos que estão representados pelos losangos, são os eventos que merecem um estudo mais aprofundado, isto é, esses eventos ainda não são a causa básica da falha. Por exemplo, é preciso descobrir qual foi a causa de se ter “nível excessivo de contaminantes no fluido”. Os eventos representados pelo círculo são as causas básicas, significa que existe informação suficiente para o evento. Não vale a pena gastar tempo e dinheiro para esta falha.

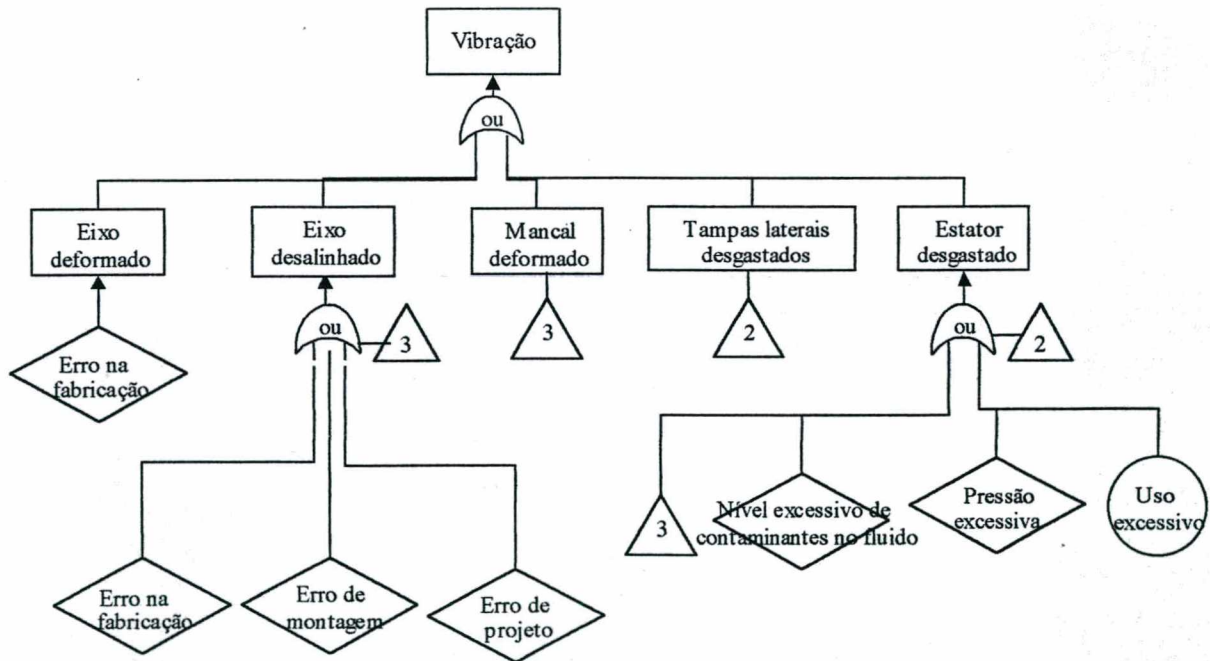


Figura 5.3 – FTA para o efeito de topo vibração.

Diferentemente do que foi proposto por KUME [1996], a seqüência de análise para o FMEA, não segue o esquema mostrado na Figura 5.4. Essa aplicação do FMEA, na bomba de engrenagens permitiu observar que esta estrutura apresentada, na Figura 5.4 não é fixa. Como foi dito anteriormente, modos de falha podem gerar novos modos de falha, e efeitos podem gerar outros efeitos. Vale ressaltar que, somente após a análise dos modos de falhas e efeitos inicia-se

o estudo das causas. A discussão conjunta (causas e modos de falhas) gera muita confusão durante as reuniões de FMEA.

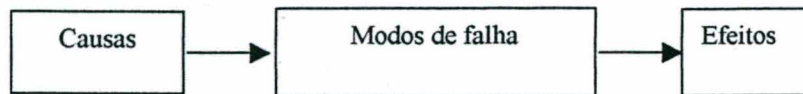


Figura 5.4 – Relação causas, modo de falha e efeitos [KUME, 1996].

5.2.2 Análise da bomba de engrenagens como um componente de um sistema hidráulico

Diferentemente do que foi feito no item anterior, aqui o FMEA será executado considerando a bomba como um componente. Viu-se que, na análise no qual a bomba de engrenagens é considerada como um sistema, a “vibração” é considerada como um efeito oriundo dos modos de falhas dos componentes internos da bomba. No entanto, se o componente bomba de engrenagens está sendo observado como um item dentro de um sistema hidráulico, a “vibração” passa a ser um modo de falha da bomba de engrenagens, que vai causar algum efeito no sistema hidráulico. É essencial que todos os membros da equipe estejam com o mesmo ponto de vista.

Analisar a bomba de engrenagens como um componente de um sistema hidráulico genérico não traz informações úteis. Embora se tenha a disposição os modos de falha da bomba, não é possível identificar os efeitos que eles iriam gerar em um sistema genérico. É preciso que se tenha informações do sistema (desenhos, modelo físico, regime de trabalho, sistemas de controle, etc.) para verificar quais os efeitos que ele irá sofrer com um dado modo de falha da bomba de engrenagens.

Desta forma, foi escolhido um circuito hidráulico para a movimentação de um cilindro. O circuito dispõe de duas bombas hidráulicas ligadas em paralelo, permitindo que o cilindro se movimente com duas velocidades, Figura 5.5.

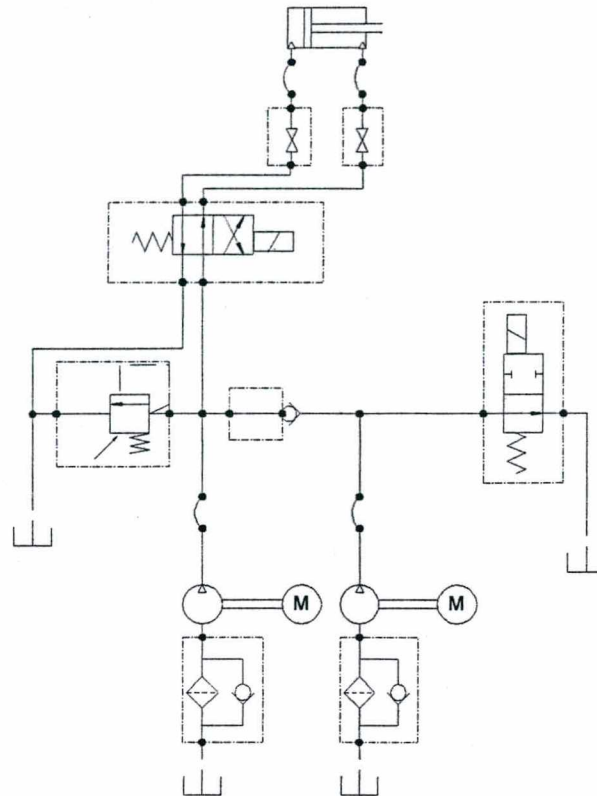


Figura 5.5 – Circuito hidráulico para movimentação de cilindro com duas velocidades (VINADÉ, 2000).

Seguindo os procedimentos recomendados nas etapas 1, 2 e 3 para o desenvolvimento do FMEA, foram tomadas as seguintes decisões:

5.2.2.1 Seleção dos componentes e descrição das funções

O sistema em estudo é o sistema apresentado na Figura 5.5, que tem a função de controlar a movimentação de um cilindro. Como componente, somente será estudado a bomba de engrenagens. A função da bomba de engrenagens é fornecer uma vazão a uma dada pressão.

5.2.2.2 Identificação dos modos de falha da bomba de engrenagens e efeitos no sistema hidráulico

Os modos de falha obtidos aqui são os efeitos da análise feita anteriormente, quando a bomba foi considerada como um sistema.

O Quadro 5.5 apresenta um formulário FMEA da bomba de engrenagens e do sistema hidráulico. O campo referente aos efeitos dos modos de falha, está destacado para mostrar que esta informação será reutilizada no FMEA do sistema hidráulico. As informações que no FMEA

da bomba de engrenagens eram efeitos, passam a ser modos de falha da bomba no FMEA do sistema hidráulico.

Quadro 5.5 – Formulário FMEA da bomba de engrenagens e do sistema hidráulico.

Sistema: Bomba de engrenagens		
Componentes	Modos de falha	Efeitos
Eixo	Deformado	Vazamento externo Vibração Vazão incorreta Ruído
	Desalinhado	
	Empenado	
	Rompido	
Mancal	Deformado	
Engrenagem (dente)	Desgastada	Vazão incorreta
	Rompido	
Estator	Desgastado / Corroído	Vazão incorreta
Tampas laterais	Desgastado	Vibração
Sistema: Sistema hidráulico para movimentação de um cilindro		
Componente	Modos de falha	Efeitos
Bomba de engrenagens	1 - Vazão incorreta	-Alteração na pressão do sistema
	2 - Ruído	
	3 - Vazamento externo	- Desconforto ao operador
	4 - Vibração	-Movimentação inadequada do atuador (velocidade) -Posicionamento incorreto do atuador

A análise inicial da bomba de engrenagens, como um sistema, facilita a obtenção dos modos de falha da bomba para a condição de componente do sistema hidráulico. As informações que antes eram efeitos do sistema bomba de engrenagens, agora passam a ser os modos de falha do componente bomba de engrenagens.

Os efeitos foram identificados mediante a estudos bibliográficos do sistema hidráulico e também analisando o circuito apresentado na Figura 5.5.

5.2.2.3 Identificação das causas dos modos de falha

As causas dos modos de falha podem ser várias e podem estar associadas à bomba, aos componentes vizinhos, ao ambiente, ao projeto do sistema hidráulico, etc.

As causas descritas a seguir estão relacionadas aos quatro modos de falha e seguem a mesma numeração apresentada no Quadro 5.5.

1 – Vazão incorreta

- Cavitação ;
- Ar na sucção;
- Baixo nível de óleo do reservatório;
 - o Vazamentos externos no sistema (conexões)
- Vazamentos internos na bomba;
 - o Estator desgastado irregularmente
 - o Tampas laterais desgastadas
 - o Desgaste de dentes das engrenagens
 - o Eixos e/ou mancais deformados
- Viscosidade inadequada do fluido de trabalho
- Rotação da bomba anormal (Velocidade / sentido de rotação)
- Vibração;
- Linha de sucção obstruída;
- Filtro obstruído;

2 – Ruído

- Cavitação;
 - o Viscosidade inadequada
 - o Rotação fora da especificação
 - o Desgaste dos dentes das engrenagens
 - o Ar na sucção
- Vibração;

3 – Vazamento externo

- Conexões e vedações danificadas ou desgastadas;
 - o Pressão excessiva ou oscilante
 - o Uso excessivo
- Eixo de acionamento desalinhado;
- Temperatura excessivamente alta;
- Abrasivos no eixo da bomba;
- Vibração excessiva

4 – Vibração

- Desgaste irregular do estator;
- Eixo desalinhado;
- Flutuação na pressão;
- Cavitação;

5.2.2.4 Resultados obtidos e Comentários

O levantamento dos modos de falha da bomba nessa segunda aplicação, não teve dificuldades, porque os dados obtidos na análise anterior da bomba (efeitos) foram aproveitados.

Levantar a função de uma bomba hidráulica é simples e bem definida, ao contrário de identificar as funções dos seus componentes, que devem trabalhar juntos para executar uma mesma função. Também não houve dificuldades na identificação dos efeitos.

Verificou-se que, a investigação para descobrir os efeitos de um modo de falha (*Bottom up*) é bem mais simples que o processo inverso (*Top down*), que corresponde à identificação das causas de uma falha. No contexto de projeto, a identificação do efeito é através do acompanhamento dos modos de falha dos componentes ou subsistemas, que é uma tarefa bem mais fácil do que estabelecer um possível efeito e identificar as suas causas porque estas podem estar fora do circuito hidráulico.

A quantidade de causas que podem conduzir a um modo de falha nesta abordagem é muito maior, dado à quantidade de variáveis que aumentam.

5.3 Análise do modo de falha e seus efeitos no protótipo da Transplantadora de mudas

O objetivo deste estudo de caso é avaliar a sistematização para aplicação de FMEA. Neste caso o FMEA foi aplicado em um protótipo de uma máquina para transplantar mudas de fumo, repolho, cebola e tomate, destinada a pequenos produtores rurais, desenvolvida por UFSC/EMC/NeDIP³. A principal característica de uma transplantadora de mudas é conduzir a muda até o solo sem causar nenhum dano à muda. Os componentes e sistemas diretamente responsáveis pela ação de transplantar as mudas devem ser robustos, ou seja, operar durante vários ciclos de plantio sem apresentar falhas. A Figura 5.6 apresenta um desenho esquemático da máquina transplantadora e sua conexão ao microtrator que faz a tração.

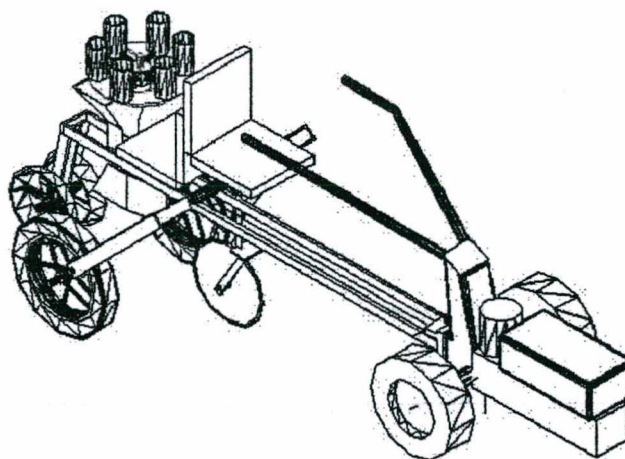


Figura 5.6 – Máquina transplantadora de mudas (CARRAFA, 2001).

Além de aplicar os conhecimentos adquiridos neste estudo, desejava-se verificar também, quais os benefícios que o FMEA poderia proporcionar a este produto. O propósito do FMEA é identificar os modos de falha e os seus efeitos. Considerando que a máquina transplantadora deva durar vários ciclos de plantio, espera-se que com a aplicação da ferramenta, pode-se obter uma máquina mais robusta. Este é um requisito fundamental para máquinas agrícolas. E foi por esse motivo ou com esse objetivo, que o projetista propôs-se participar desta experiência.

³ Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NEDIP) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, como tema de dissertação de mestrado.

5.3.1 Reuniões do FMEA para análise da transplantadora

O processo de discussão visando a aplicação do FMEA iniciou em Setembro de 2000. Inicialmente foram realizadas reuniões semanais. O processo encerrou-se em Novembro com algumas discussões para fazer avaliações e alguns ajustes, principalmente, em relação à definição dos modos e dos efeitos. Durante a aplicação foi possível perceber que as etapas do desenvolvimento do FMEA eram iterativas, como na metodologia de projeto, necessitando algumas vezes retornar às etapas anteriores para adicionar ou modificar informações, para que o processo não fosse interrompido. Em outras palavras, por vezes chegava-se a determinados impasses provocados por interpretação ou denominação inadequada da fase anterior. A equipe deve ter em mente que o importante não é o destaque de um ou outro participante, mas sim, obter-se um resultado que contemple os objetivos propostos.

Inicialmente a equipe foi composta pelo projetista da máquina, e pelo especialista em FMEA. Nesta primeira fase foram discutidos todos os aspectos relacionados ao processo, onde o projetista discorreu sobre o produto e o especialista em FMEA apresentou as potencialidades e restrições da ferramenta.

Neste processo inicial foi estudado o modelo físico, relacionando os componentes e suas funções. Procurou-se discutir sobre alguns modos de falha e seus efeitos, construir as tabelas para efetuar os registros e fazer algumas prospecções sobre os modos mais críticos. Deve-se ressaltar que se estava trabalhando na fase do projeto detalhado, construção e montagem. O protótipo já estava montado, e por isso, algumas reuniões foram realizadas na oficina analisando diretamente o protótipo. Em outras reuniões foram analisados documentos oriundos do projeto: desenhos dos componentes, diagrama de funções e partes do protótipo. A vantagem de se aplicar o FMEA na fase do projeto detalhado está associada à quantidade e ao detalhe das informações a disposição para a análise. A desvantagem está associada ao fato de que para efetuar as modificações propostas tem-se um custo relativamente alto.

Após a sistematização inicial, ampliou-se a formação da equipe de FMEA com mais três membros⁴. Observa-se que não é necessário que a equipe de FMEA mantenha a mesma formação durante todas as reuniões, ela pode sofrer alteração ao longo da atividade, requisitando a presença de outras pessoas a equipe. Além disso, nem sempre é possível contar com a presença de todos. Se não houver esta flexibilidade torna-se difícil manter uma regularidade das reuniões. Recomenda-se, no entanto, que o responsável pelo desenvolvimento do produto e o especialista

⁴ Um professor/especialista em confiabilidade, um professor de máquinas agrícolas, um engenheiro agrícola/doutorando em desenvolvimento de produto.

em FMEA sempre estejam presentes. Com a inclusão dos novos participantes retomou-se o estudo de todas as etapas. A velocidade no processo de análise foi maior porque o processo já tinha sido deflagrado. Houve, como é de se esperar, uma série de alterações em todas as fases do processo que já haviam sido discutidos. O refinamento dos nomes (Quadro 5.7), funções (Quadro 5.8) e detalhamento (Quadro 5.9) ocorreram neste novo instante.

Pode-se então, se concentrar em construir a planilha com os modos de falha e os seus efeitos, Quadro 5.10 .

5.3.2 Estudo do modelo físico e seleção dos principais itens e funções

O projeto desta máquina foi feito seguindo as etapas da Metodologia de Projeto de Sistemas Modulares (MARIBONDO, 2000). Assim o projeto foi dividido em vários módulos ou subsistemas, Quadro 5.6.

Quadro 5.6 – Módulos funcionais da transplantadora de mudas (CARRAFA, 2001).

Denominação do módulo funcional	Funções contidas no módulo
Cortar Palha (E 1)	Regular subconjunto
	Cortar palha
Adubar (E 2)	Regular subconjunto
	Abastecer reservatório
	Reservar adubo
	Dosar adubo
Armazenar água (E 3)	Conduzir adubo
	Abastecer reservatório
Dosar água (E 4)	Reservar água
	Regular subconjunto
	Dosar água
Colocar muda no solo (B 1)	Conduzir água
	Regular subconjunto
	Dosar muda
	Conduzir mudas
Abrir sulco (Au 1)	Posicionar muda
	Regular subconjunto
Reservatório de muda (Au 2)	Romper solo
	Abastecer reservatório
Alimentar dosador (Au 3)	Reservar muda
	Alimentar dosador de muda
Fechar sulco Au 4	Colocar terra sobre a muda
	Limitar profundidade
	Regular subconjunto
	Pressionar solo

Denominação do módulo funcional	Funções contidas no módulo
Acionamento (Au 5)	Regular subconjunto
	Transmitir potência
	Captar potência
Locomoção (Au 6)	Acionar deslocamento
	Dar mobilidade
Dirigir (Au 7)	Imprimir direção
Formar estrutura (Au 8)	Unir partes

A aplicação do FMEA foi feita no módulo B1 (“Colocar muda no solo”), área em destaque no Quadro 5.6., mais especificamente, nos sistemas relacionados com o sistema de acionamento do mecanismo de transporte de mudas e com o próprio sistema de transporte de mudas. Estes sistemas foram selecionados porque se relacionam diretamente à da função principal da máquina, que é transplantar as mudas até o solo. Os outros sistemas ou módulos existentes, embora importantes, estão presentes em quase todas as máquinas agrícolas de plantio, não foram objeto deste estudo.

Por exemplo: chassi, rodas não foram considerados devido à simplicidade, serem bastante robustos e não estarem diretamente associados com a função plantar a muda. A Figura 5.8 apresenta os principais componentes cujos nomes estão listados no Quadro 5.7. Alguns componentes foram agrupados e tratados como componentes únicos. O sistema de transmissão (Figura 5.8, item 11) é composto por um conjunto de engrenagens e uma roda dentada, mas foi considerado como um único componente. É um sistema simples que recebe o movimento através da corrente de transmissão e passa para o “eixo do dispositivo de alojamento”. Este conjunto foi considerado como um componente único devido a sua simplicidade e robustez. É preciso que se faça este tipo de racionalização para reduzir a quantidade de componentes e para não poluir a análise com informações excessivas. Decidiu-se que o importante é manter foco voltado para as partes novas do mecanismo de distribuição de mudas, que não são encontrados em projetos anteriores, os quais têm maiores chances de falha.

A Figura 5.7, apresenta uma fotografia da parte da transplantadora, na qual foi feito o estudo de caso. Na fotografia aparecem os módulos de recepção e condução das mudas, módulo abridor dos sulcos e as rodas compactadoras.

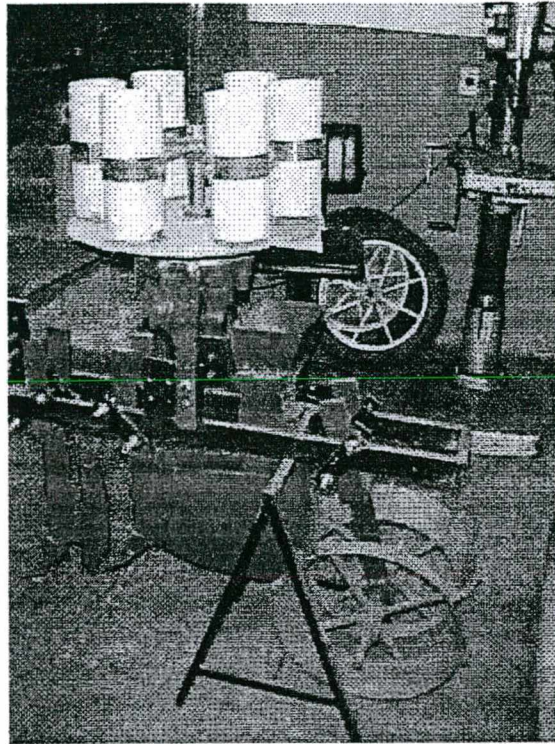


Figura 5.7 – Módulo "colocar muda no solo", desenvolvido por CARRAFA (2001).

A Figura 5.8 apresenta um desenho esquemático do módulo que será analisado.

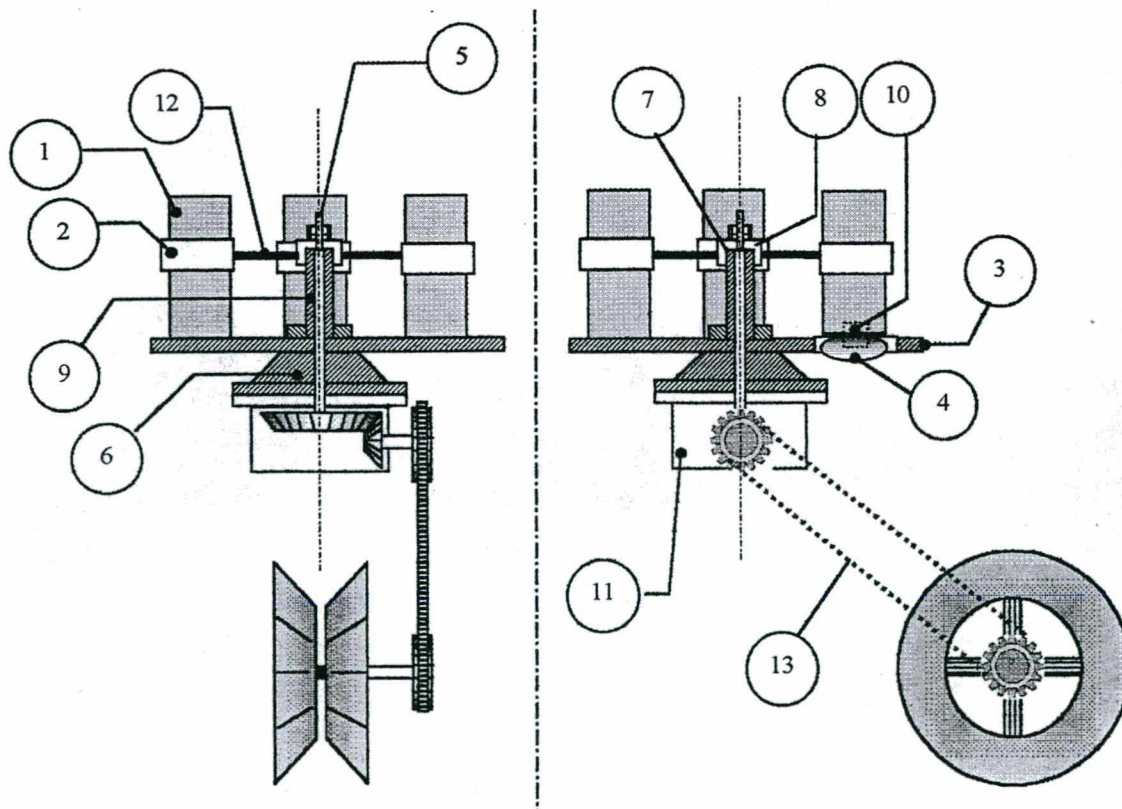


Figura 5.8 – Figura esquemática do módulo da transplantadora de mudas.

A primeira tarefa a ser feita na aplicação do FMEA foi estudar o modelo físico e identificar cada item que constitui o modelo. Como este projeto é inédito, muito dos itens presentes na Figura 5.8 ainda não estavam perfeitamente identificados, ou seja, ainda não tinham uma nomenclatura apropriada. Foi preciso então definir o nome de cada item. O nome precisa dar identidade ao item, ou seja, ele deve identificar qual parte do sistema está sendo referenciado. Também através do nome do componente é possível ter-se uma idéia da função que este irá desempenhar.

De uma certa forma, nas primeiras reuniões, havia confusão entre a definição do nome do item e a sua função. À medida que as reuniões foram ocorrendo, as descrições dos nomes dos itens e as suas funções foram definidas de forma mais adequada. No Quadro 5.7, na coluna 1, tem-se a numeração dos componentes registrados na Figura 5.8. Nas colunas seguintes, 2, 3 e 4 estão registradas as mudanças, progressivas, dos nomes dos componentes

Quadro 5.7 – Mudança dos nomes dos componentes.

N. do componente na Fig. 5.8	Nome do componente (Início)	Segunda modificação	Nome do final do componente
1	Cano dosador	Dispositivo distribuidor de mudas	Alojador de mudas
2	Estrutura de fixação do cano dosador	-----	Fixação do alojador
3	Disco de suporte do distribuidor de mudas	Disco guia	Mesa
4	Tampa do cano	-----	Fundo do alojador
5	-----	-----	Eixo do dispositivo de alojamento
6	Eixo de acionamento	Suporte para acoplar ao sistema de transmissão	Suporte do eixo da transmissão
7	Eixo fixo / mancal	-----	Eixo/mancal
8	-----	-----	Mancal
9	Eixo fixo	-----	Eixo
10	-----	-----	Dobradiça
11	-----	-----	Sistema de transmissão
12	-----	-----	Fixação da – estrutura dos alojadores – ao eixo de acionamento
13	-----	-----	Corrente de transmissão

Na descrição das funções dos componentes recomenda-se que estas sejam feitas de maneira concisa e clara, fazendo uso de um verbo para descrever uma ação. No entanto, algumas vezes isso não é possível de ser feito, resultando em funções descritas de maneira extensa, para não comprometer o entendimento. O fato de se usar uma frase ao invés de um verbo para descrever uma ação não prejudicou a análise. Mas vale ressaltar que se buscou escrever as funções da maneira mais concisa possível.

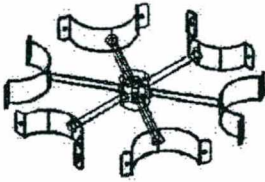
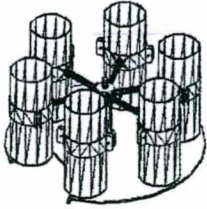
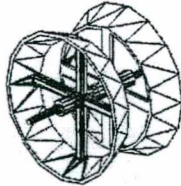
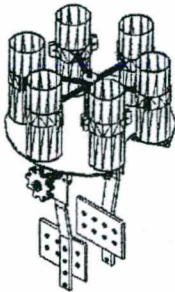
Quadro 5.8 – Mudanças da descrição das funções dos componentes (CARRAFA, 2001).

N. do componente na Fig. 5.8	Nome do componente	Função inicial	Função atual
1	Alojador de mudas	Dosar a muda	Alojar a muda
2	Fixação do alojador	Fixar os canos	Fixar os alojadores
3	Mesa	Guia para os canos se moverem circunferencialmente sobre ele	Manter o fundo dos alojadores fechados
4	Fundo do alojador	Empregada para prover a proteção/condução e dosagem da muda	Proteção/condução e dosagem da muda
5	Eixo do dispositivo de alojamento	Transmitir o movimento rotativo para o suporte do cano mover-se e fazer a dosagem	Transmitir o movimento rotativo para o alojador
6	Suporte do eixo da transmissão	Base para suportar o disco guia, o eixo de acionamento, eixo fixo e acoplar ao sistema de acionamento.	Base para suportar a mesa, o eixo do alojador de mudas, eixo e acoplar ao sistema de acionamento.
7	Eixo/mancal	-----	Permitir o movimento rotativo
8	Mancal	Dar suporte ao eixo	Suportar o eixo
9	Eixo	Dar suporte a estrutura de fixação do cano	Suporte e girar o alojador de muda.
10	Dobradiça	Permitir abertura e fechamento da tampa dosadora	Permitir abertura e fechamento do fundo do alojador.
11	Sistema de transmissão	Receber o movimento da corrente transmissora de energia e transmiti-la ao eixo de acionamento	Receber o movimento da corrente transmissora de energia e transmiti-la ao eixo do alojador de muda
12	Fixação da – estrutura dos alojadores – ao eixo de acionamento	-----	Garantir a transmissão de movimento do eixo para o suporte do alojador para promover a dosagem da muda
13	Corrente de transmissão	-----	Transmitir movimento da roda de compactação para o sistema de transmissão.

Mesmo depois da definição dos nomes dos componentes, as funções passaram por várias mudanças. Estas adaptações foram efetuadas até quando já estava sendo feita a identificação dos modos de falha ou a identificação dos efeitos. No Quadro 5.8, tem-se as funções, onde, na coluna 3 está mostrado um primeiro estudo da função e, na coluna 4, tem-se a definição final da função de cada um dos itens do sistema de condução de mudas.

Nessa atividade de estudo do modelo físico, percebeu-se que além de ter a função definida, era preciso fazer uma descrição do item, comentando sua função e o seu relacionamento com os itens a ele vinculados. Essa tarefa uniformizou o nível de conhecimento dos membros da equipe e facilitou a análise dos modos de falhas e os seus efeitos. O Quadro 5.9 procura sintetizar o estudo efetuado.

Quadro 5.9 – Componentes da transplantadora de mudas (CARRAFA, 2001).

Comentários	Figura
<p>A fixação da estrutura dos alojadores é composta de hastes soldadas ao mancal em uma das extremidades e às braçadeiras na outra. As braçadeiras são usadas para prender os alojadores.</p>	
<p>A mesa sob os alojadores é constituída de uma placa de aço circular com uma abertura para permitir que as mudas desçam seqüencialmente para outros módulos da máquina até chegarem ao solo.</p>	
<p>As rodas compactadoras têm a função de enterrar as raízes das mudas depositadas nos sulcos. No eixo das rodas compactadoras é fixada uma roda dentada que aciona a corrente de transmissão.</p>	
<p>Abaixo da mesa dos alojadores é possível ver a roda dentada que recebe movimento vindo da corrente de transmissão. A roda dentada aciona as engrenagens que movimentam o eixo do dispositivo de alojamento.</p>	

5.3.3 Identificação dos modos de falha e seus efeitos

Alguns modos de falha são intrínsecos do eixo (empenado, desalinhado, rompido) e outros do mancal (desalinhado, desgastado). Mas podem existir outros modos de falha que ocorrem com a interface “eixo/mancal” (engripado), por isto a interface foi considerada como um componente. Embora um eixo empenado possa causar o travamento do sistema, o eixo/mancal foi considerado como um componente à parte porque alguns modos de falha estão relacionados, especificamente, a essa interface.

As máquinas agrícolas são muito suscetíveis às falhas ocultas⁵, devido ao uso descontínuo em períodos específicos do ano e também devido ao ambiente agressivo em que trabalham, ou mesmo quando ficam guardadas. Por isto, é muito importante que a interface seja considerada como um componente, para lembrar de alguns cuidados que devem ser tomados como, por exemplo, os problemas relacionados com a sujeira e a oxidação. Desta forma, buscase prevenir de problemas dessa natureza os quais, muitas vezes, levam à falhas ocultas, que serão percebidas apenas no momento em que a máquina for posta em operação.

As reuniões para o levantamento dos modos de falha e dos efeitos foram feitas no laboratório da UFSC/EMC/NeDIP, onde foi desenvolvido o protótipo. Os componentes do protótipo foram analisados montados ao protótipo, facilitando muito a análise nessa etapa. Os modos de falha e os seus efeitos estão apresentados no Quadro 5.10.

Quadro 5.10 – Componentes, modos de falha e efeitos (CARRAFA, 2001).

Componente	Modo de Falha	Efeito
1 – Alojador de mudas	– desprende	– impede a condução da muda – plantio de muda danificada
	– ruptura	– impede a condução da muda – plantio de muda danificada
2 – Fixação do alojador	– ruptura	– não efetua a distribuição
	– desprendimento da fixação do cano	– não efetua a distribuição
	– desprendimento da estrutura do suporte dos canos com o eixo de acionamento	– não efetua a distribuição
3 – Mesa	– desprende	– Deixa de haver sincronismo (irregularidade na deposição das mudas)

⁵ Uma falha oculta é aquela que se manifesta somente no momento em que o sistema é posto em operação.

Continuação do Quadro 5.10.		
Componente	Modo de Falha	Efeito
4 – Fundo do alojador	– ruptura	– plantio de mudas danificadas – bloqueia a passagem de mudas
	– empena	– plantio de mudas danificadas – tranca a muda.
	– desgasta	– plantio de mudas danificadas – tranca a muda
5 – Eixo do dispositivo de alojamento	– ruptura	– não efetua a distribuição da muda
	– desgasta	– efetua a distribuição de mudas sem uniformidade
	– empena	– não efetua a distribuição de muda
6 – Suporte do eixo da transmissão	– desprende do sistema de transmissão	– não efetua a distribuição de muda
	– desprende do disco guia	– não efetua a distribuição de muda
7 – Eixo/mancal	– engripamento	– não efetua a distribuição de muda
	– funcionamento intermitente	– efetua a distribuição sem uniformidade
8 – Mancal	– desgasta	– não efetua a distribuição de muda
	– ruptura	– não efetua a distribuição de muda
9 – Eixo	– ruptura	– não efetua a distribuição de muda
	– desgaste	– não efetua a distribuição de muda – efetua a distribuição sem uniformidade
10 – Dobradiça	– entorta	– não efetua a distribuição de muda – efetua a distribuição sem uniformidade
	– ruptura	– não efetua a distribuição de muda
	– desgasta	– não efetua a distribuição de muda – efetua a distribuição sem uniformidade
	– emperra	– não efetua a distribuição de muda
11 – Sistema de transmissão	– ruptura	– não efetua a distribuição de muda
	– engripamento	– não efetua a distribuição de muda
	– escorrega	– não efetua a distribuição de muda
12 – Fixação da – estrutura dos canos alojadores – ao eixo de acionamento	– desprender	– não efetua a distribuição de muda
13 – Corrente de transmissão	– ruptura	não efetua a distribuição de muda

As especificações dos efeitos também sofreram mudanças. Inicialmente, era somente dito: perda total da função ou perda parcial da função. Vários efeitos podem ser classificados como “perda parcial da função” ou “perda total da função”. Contudo, estas especificações não se constituem numa informação eficiente para uma tomada de decisão em termos de projeto ou manutenção. É necessário que a informação seja descrita de uma maneira mais detalhada e específica. Então, passou-se a escrever: Não efetua a distribuição da muda, Efetua a distribuição da muda sem uniformidade, Plantio de mudas danificadas, Impede a condução da muda.

A descrição mais específica permitiu avaliar os efeitos com maior eficácia, podendo levantar os efeitos mais críticos e a partir disto, pesquisar alternativas de projeto.

5.3.4 Seleção dos efeitos mais importantes e levantamento das causas dos modos de falha.

Nesta etapa, os efeitos foram avaliados, verificando os aspectos de segurança, manutenção, confiabilidade e custos.

Segurança: As partes móveis da máquina, como as regiões da máquina que apresentam lâminas ou objetos pontiagudos devem estar protegidas para evitar expor os usuários a acidentes.

Manutenção: A manutenção da máquina deve estar programada. Quando ocorrer uma falha esta deve ocorrer em peças simples, de fácil reposição, permitindo que a máquina seja posta em operação sem dificuldades.

Confiabilidade: Os componentes envolvidos com as funções principais da máquina, devem ter os tempos médios entre falhas maior do que o número de ciclos de plantio mínimo, necessário para abater o investimento feito.

Custo: Caso não seja possível evitar a falha, os prejuízos devem ser mínimos. Os prejuízos devem estar associados a componentes de fácil manutenção e baixo custo, visando à disponibilidade da máquina.

As falhas mais significativas são as falhas associadas à “danificação da muda”. Estas foram consideradas piores porque pode trazer prejuízos maiores que a própria manutenção da máquina, dado que leva ao plantio de mudas danificadas. Neste caso, tem-se a perda das mudas.

O Quadro 5.11 traz a lista das causas dos modos de falha que estão associados com a danificação da muda.

Quadro 5.11 – Causas dos modos de falha relacionadas com a danificação da muda (CARRAFA, 2001).

Componente	Modo de Falha	Causa do modo de falha
1 – Alojador de mudas	– desprende	– A braçadeira rompe – O parafuso de conexão da braçadeira solta da porca – O parafuso rompe
	– ruptura	– Rompe onde é conectada a braçadeira – Rompe onde é conectada a dobradiça
2 – Dobradiça	– empena	– Quando prende ao disco guia – Bate lateralmente no bocal de dosagem
	– ruptura	– Porque prendeu-se à mesa – A tampa é muito pesada e quando esta fica suspensa não resiste – Rotação de trabalho elevada
	– desgasta	– Muitas horas de trabalho – Material pouco resistente para a aplicação
	– oxidação	– Devido ao substrato da muda que vai caindo no eixo que conecta as abas da dobradiça – Falta de lubrificante dificulta o movimento relativo das abas da dobradiça
	– emperra	– proteger quanto à presença de resíduos no eixo da dobradiça.

5.3.5 Apresentação das possíveis soluções com base nos efeitos, modos e causas das falhas.

Diante do estudo feito, propõe-se alguns princípios de solução para as causas dos modos de falha, com maior chance de ocorrência, Quadro 5.12. Durante as reuniões realizadas oficialmente, a “corrente de transmissão” não havia sido incluída na lista de componentes. Na revisão do material percebeu-se a necessidade de incluí-la e isto chamou a atenção para um detalhe muito importante que são as partes móveis da máquina que estão expostas. Estas partes devem ser isoladas para que não ameacem a segurança do usuário. Então, uma alteração que deve ser feita no projeto é isolar a corrente de transmissão e as rodas dentadas com uma grade de proteção para proteção dos operadores.

Quadro 5.12 – Princípio de solução para as causas dos modos de falha (CARRAFA, 2001).

Causa do modo de falha/Porque da falha		Princípio de solução para a causa do modo de falha
Alojador de mudas	- O parafuso de conexão da braçadeira afrouxa	- arruela de pressão - requer uso de contra porca
	- Ruptura na conexão das dobradiças	- colocar uma luva onde vai a braçadeira - usar um tubo mais resistente
	- Ruptura onde é conectada a dobradiça	- usar outro tipo de fixação da dobradiça
Dobradiça	- Bate lateralmente no bocal de dosagem	- anteparo de condução
	- A tampa é muito pesada proporcionando a ruptura	- usar material mais leve na confecção da tampa - fazer uso de outro mecanismo para ajudar a suportar o peso da tampa
	- Material pouco resistente para a aplicação	- substituir o material de fabricação da dobradiça - dar maior rigidez ao componente de união entre as abas.
	- Devido ao substrato da muda que vai caindo no eixo que conecta as abas da mesma.	- uma capa de proteção desse mecanismo - aumentar a resistência - material resistente à oxidação
	- Cargas dinâmicas (impactos, vibrações), elevadas no fundo do alojador	- suavizar o movimento relativo entre o fundo do alojador com a mesa de sustentação utilizando uma placa de polímero.
Corrente e Roda dentada	- Partes expostas ameaçando a segurança do cliente.	- Isolamento dos componentes utilizando uma tela metálica .

5.3.6 Resultados obtidos e comentários

O Quadro 5.12 foi elaborado considerando que as falhas iriam ocorrer, embora não se tenha certeza se vão ocorrer realmente. Portanto, antes de partir para a implementação das ações recomendadas no Quadro 5.12, alguns testes e simulações deveriam ser feitas para estudar as falhas em função das chances de ocorrência, junto com uma avaliação de custos, buscando priorizar as ações.

A Figura 5.9 apresenta a solução para a vibração, através da ação, a inclusão de uma placa de polímero sobre a mesa, buscando reduzir as cargas dinâmicas, principalmente, depois da

liberação da muda para o solo, quando se tem novamente o início do contato do fundo do alojador com a mesa.

Esta medida adotada foi de baixo custo e reduz as cargas no fundo do alojador, sobre a dobradiça e no próprio alojador de mudas. Com esta medida adotada espera-se evitar as falhas geradas pelas cargas dinâmicas e também obter redução dos níveis de ruído entre as peças em movimento.

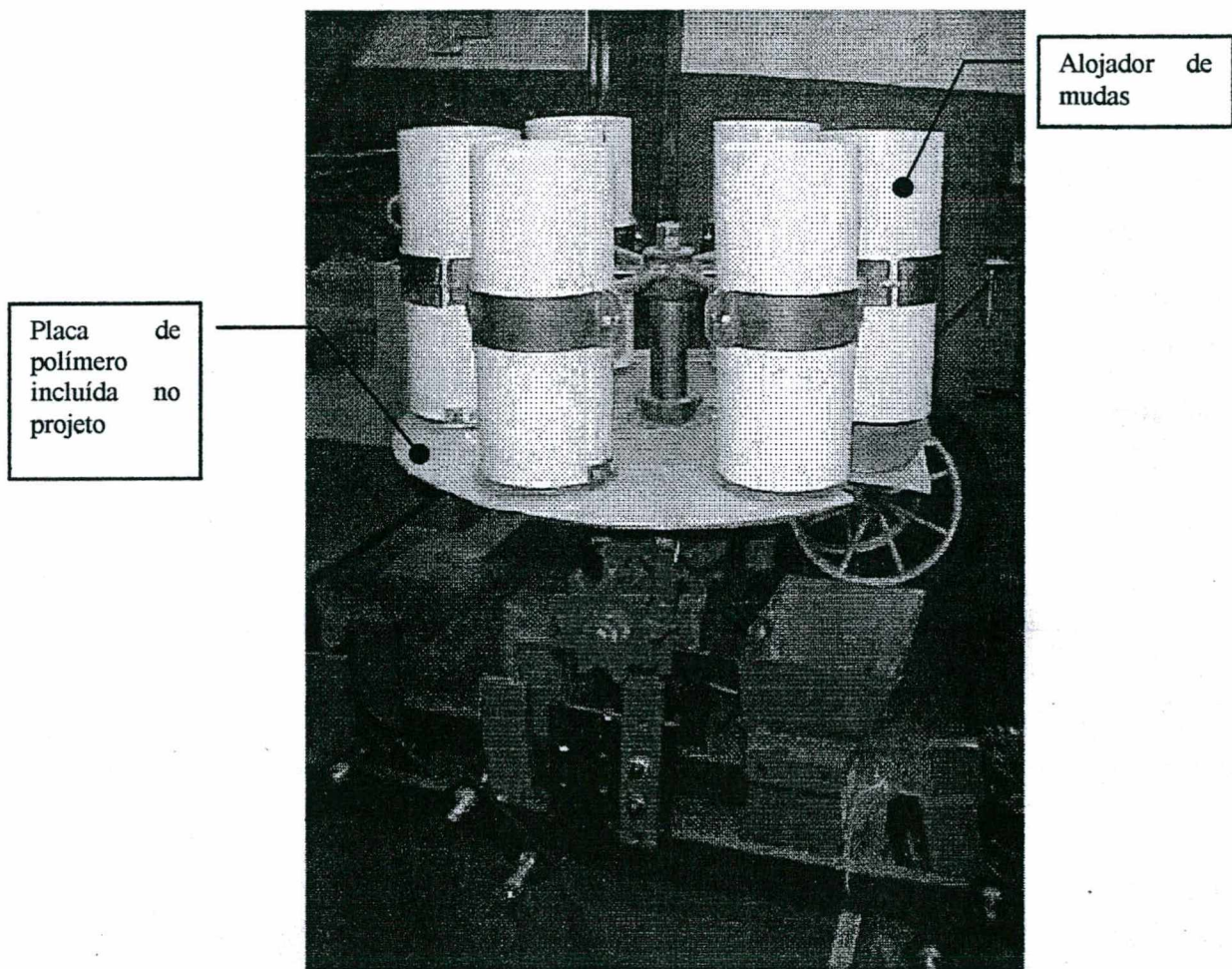


Figura 5.9 – Inclusão de uma placa de polímero para redução das cargas dinâmicas.

5.4 Uso de árvores de falha para representar eventos de falha em sistemas hidráulicos com vistas à aquisição do conhecimento

Como visto na revisão, a árvore de falhas é uma ferramenta de avaliação qualitativa e quantitativa, cujo objetivo é auxiliar o projetista, o planejador ou o operador de sistemas a tomar decisões relativas ao que fazer no caso de falhas e investigar as causas que levaram à falha. Os dados apropriados devem ser configurados numa árvore, a partir do conhecimento preciso do funcionamento do sistema que se deseja analisar, permitindo assim, dispor-se de uma avaliação ou de um melhor conhecimento, do sistema em análise.

Essa condição do FTA foi utilizada pelo engenheiro do conhecimento, com o objetivo de facilitar a obtenção de informações de especialistas em sistemas hidráulicos, utilizados em navios. O trabalho visa gerar um sistema especialista para diagnóstico de falhas para esses sistemas.

Segundo Edward Feigenbaun, citado por VINADÉ (2000), um sistema especialista é um programa inteligente de computador, que usa conhecimento e inferência de procedimento, para resolver problemas que são suficientemente difíceis, para requerer uma significativa perícia humana para sua solução.

O processo de desenvolvimento de um sistema especialista é constituído basicamente de 4 etapas: aquisição do conhecimento; representação do conhecimento; implementação computacional e teste. A aplicação aqui relatada do FTA está associada à etapa de representação do conhecimento.

Em função da convivência nos laboratórios⁶ e da troca de informações sobre os temas de dissertação que estavam sendo estudadas, iniciou-se um diálogo entre os mestrandos, que motivou o Engenheiro do Conhecimento a experimentar a técnica do FTA para facilitar o diálogo com o especialista, na etapa de representação do conhecimento. A esta altura, já havia razoável clareza sobre os problemas existentes, tanto nos sistemas hidráulicos a serem estudados quanto em relação às informações a serem adquiridas para formalizar o sistema especialista. No entanto, antes da utilização do FTA, foi feito uso das redes de inferência para representar os eventos de falha. A descrição da utilização do FTA e das redes de inferência, será apresentada a seguir.

⁶ LASHIP (Laboratório de Sistemas Hidráulicos & Pneumáticos) e NEDIP (Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos).

5.4.1 O estudo do sistema hidráulico

O sistema que está sendo considerado, para o desenvolvimento do sistema especialista protótipo, é responsável pelo acionamento e controle do leme de um navio, podendo ser controlado manualmente ou automaticamente. A Figura 5.10 apresenta o circuito hidráulico correspondente para o controle do leme.

A ferramenta escolhida para a aquisição do conhecimento foi a entrevista. Desta forma, o processo de aquisição do conhecimento iniciou com um estudo bibliográfico (livros e manuais), de componentes e do sistema hidráulico, para se familiarizar com as terminologias utilizadas e assim facilitar a comunicação com os especialistas, no caso, os operadores de controle e manutenção do sistema hidráulico.

Mesmo depois do estudo bibliográfico, a diferença entre o conhecimento do especialista e do engenheiro do conhecimento ainda era bastante grande, pois os especialistas convivem diariamente com o sistema e adquiriram muito conhecimento através da experiência. Eles possuem uma percepção bastante aguçada das informações, como as relações de causa e efeito das falhas, componentes mais críticos para o sistema e os mais suscetíveis às falhas. Muitos desses conhecimentos não estão disponíveis nos livros.

O problema é bem claro, captar o conhecimento do especialista de forma que possa ser implementado em um sistema especialista para diagnosticar as falhas do sistema hidráulico para controle do leme do navio.

Os problemas que dificultaram a aquisição do conhecimento foram:

1) Os especialistas estavam em seus ambientes de trabalho, portanto o contato deveria ser realizado durante o expediente e regulado pela disponibilidade de tempo dos mesmos, normalmente, muito exíguo.

2) Um questionário foi formulado para os especialistas responderem. As perguntas feitas pelo engenheiro do conhecimento, muitas vezes, eram interpretadas pelo especialista e as respostas não condiziam com as expectativas iniciais. A sabedoria do especialista está organizada para resolver os problemas de acordo com sua percepção e não na seqüência organizada de passos.

Foi necessário então, para resolver esses problemas, adotar uma forma de representar o conhecimento que ficasse claro para todos, facilitando o trabalho do entrevistador em captar melhor as idéias do especialista e organizá-las podendo fazer mais questionamentos, sendo mais objetivo e fiel.

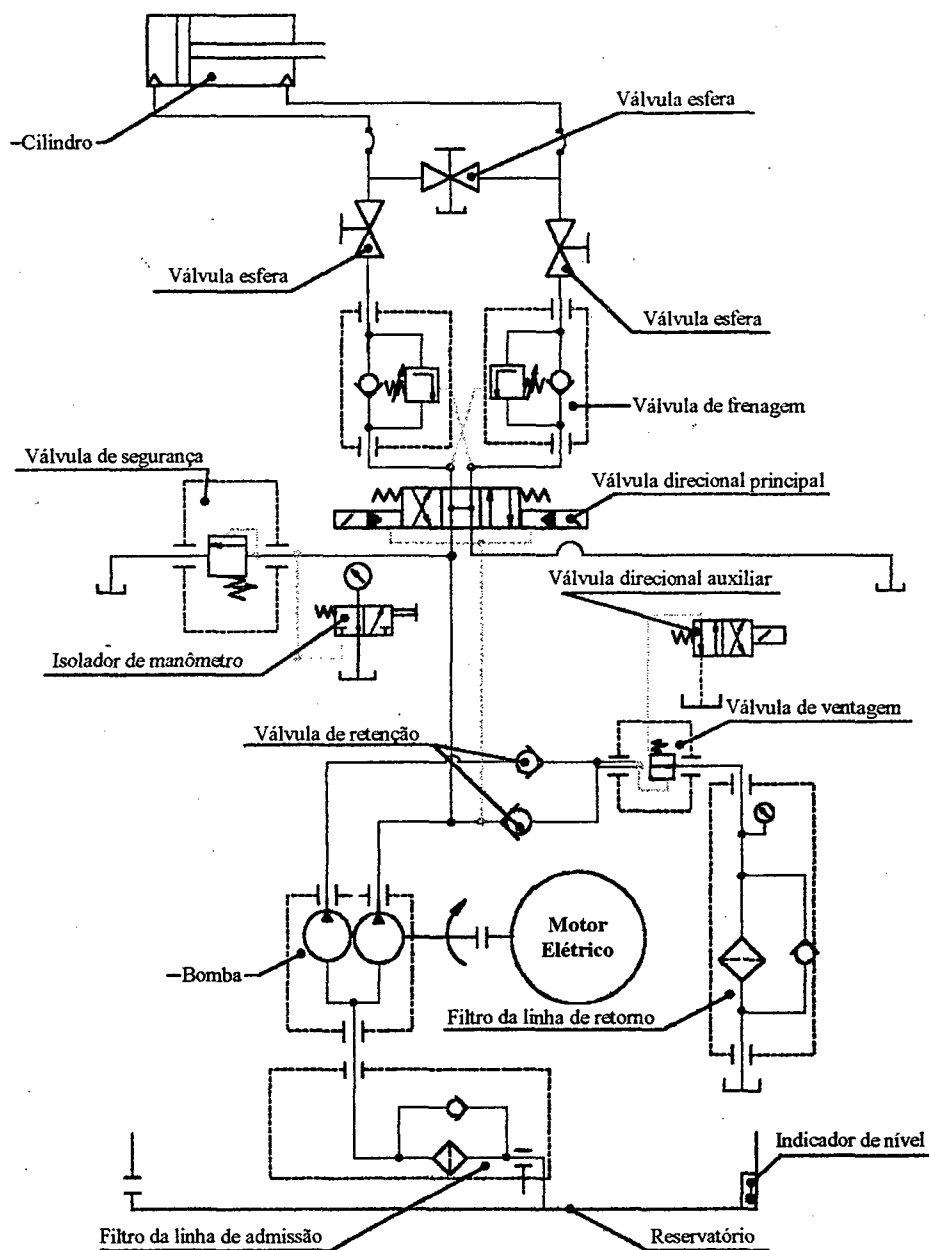


Figura 5.10 – Sistema hidráulico para controle do leme (ALVES, 2001).

5.4.2 Ferramentas para a representação do conhecimento

Com uma boa representação do conhecimento, torna-se mais fácil para o especialista opinar e dar sugestões, corrigir alguma má interpretação. Também, com uma boa representação, há maior eficiência e aproveitamento das reuniões. Mesmo com pouco tempo para as reuniões, as informações estariam sendo coletadas.

Em função das dificuldades apresentadas, o engenheiro do conhecimento procurou representar o sistema hidráulico e os problemas relacionados às falhas e ações de manutenção através de redes de inferência. A rede de inferência faz o relacionamento dos efeitos com as

causas do sistema, Figura 5.11. Este relacionamento ajudou o entrevistador na organização das falhas, mas ainda assim, ficou difícil fazer a identificação de onde inicia uma falha (causas básicas) e onde termina (efeitos no sistema). A representação do conhecimento através da rede de inferência apresentou-se confusa e complexa e apresentava dificuldades de comunicação entre entrevistador e especialista.

À medida que um maior detalhamento é feito na rede de inferência aumenta-se a complexidade da rede, dificultando a sua análise até mesmo para os especialistas.

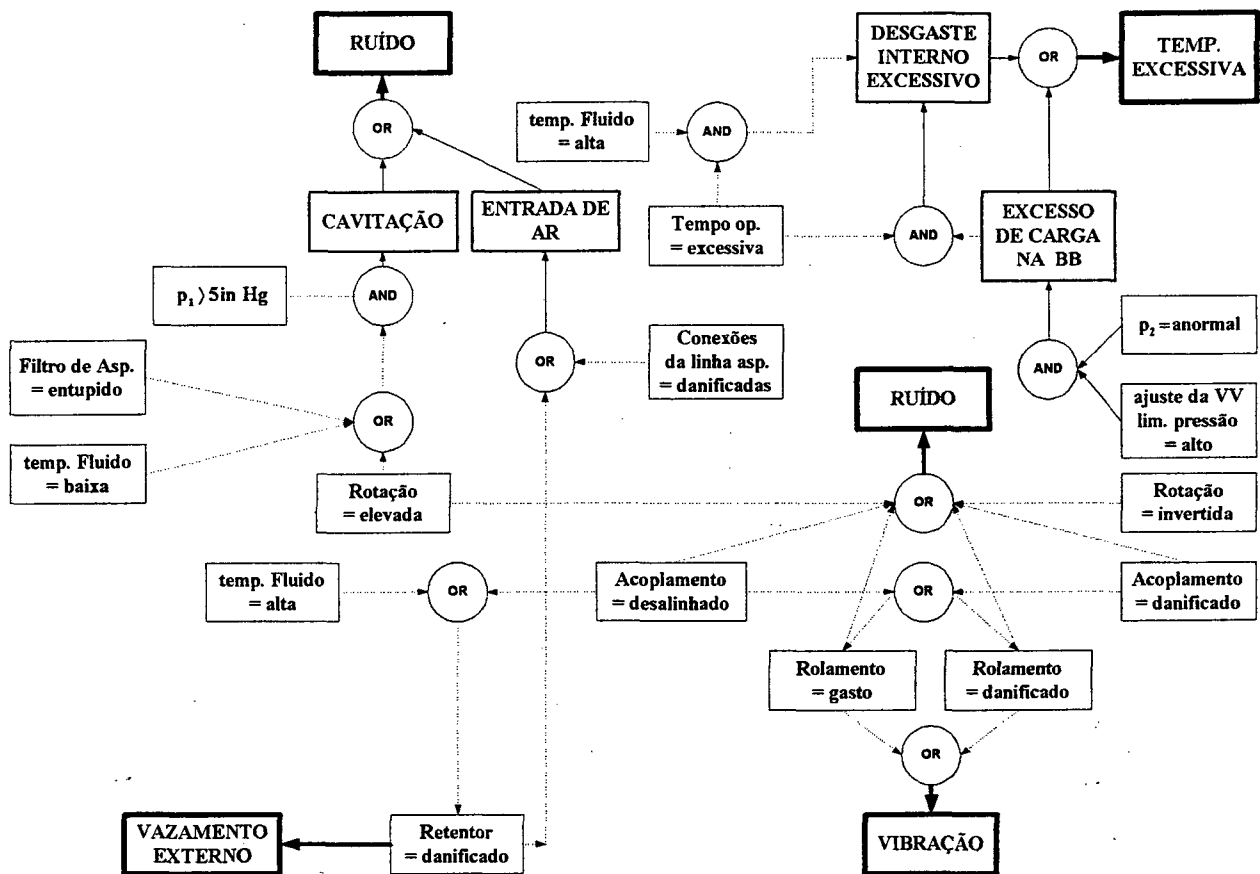


Figura 5.11 – Rede de inferência utilizada para organizar o relacionamento entre as falhas (ALVES, 2001).

O FTA adaptou-se perfeitamente às necessidades do engenheiro do conhecimento. A partir da sua adoção, a comunicação com os especialistas ocorreu de maneira surpreendentemente mais proveitosa. A relação entre causa e efeito em uma árvore de falhas aparece de uma maneira muito organizada. Além, é possível organizar os eventos na árvore de falhas em função das probabilidades de ocorrência dos eventos. Por convenção, foi adotado que os eventos com maior probabilidade de ocorrência estariam mais à esquerda da árvore de falhas e os eventos com menor probabilidade à direita. Logo, analisando a Figura 5.12, é possível

concluir, por exemplo, para o primeiro nível hierárquico da árvore que um “movimento inadequado do êmbolo” tem maiores chances de ocorrer do que uma “falha no solenóide”.

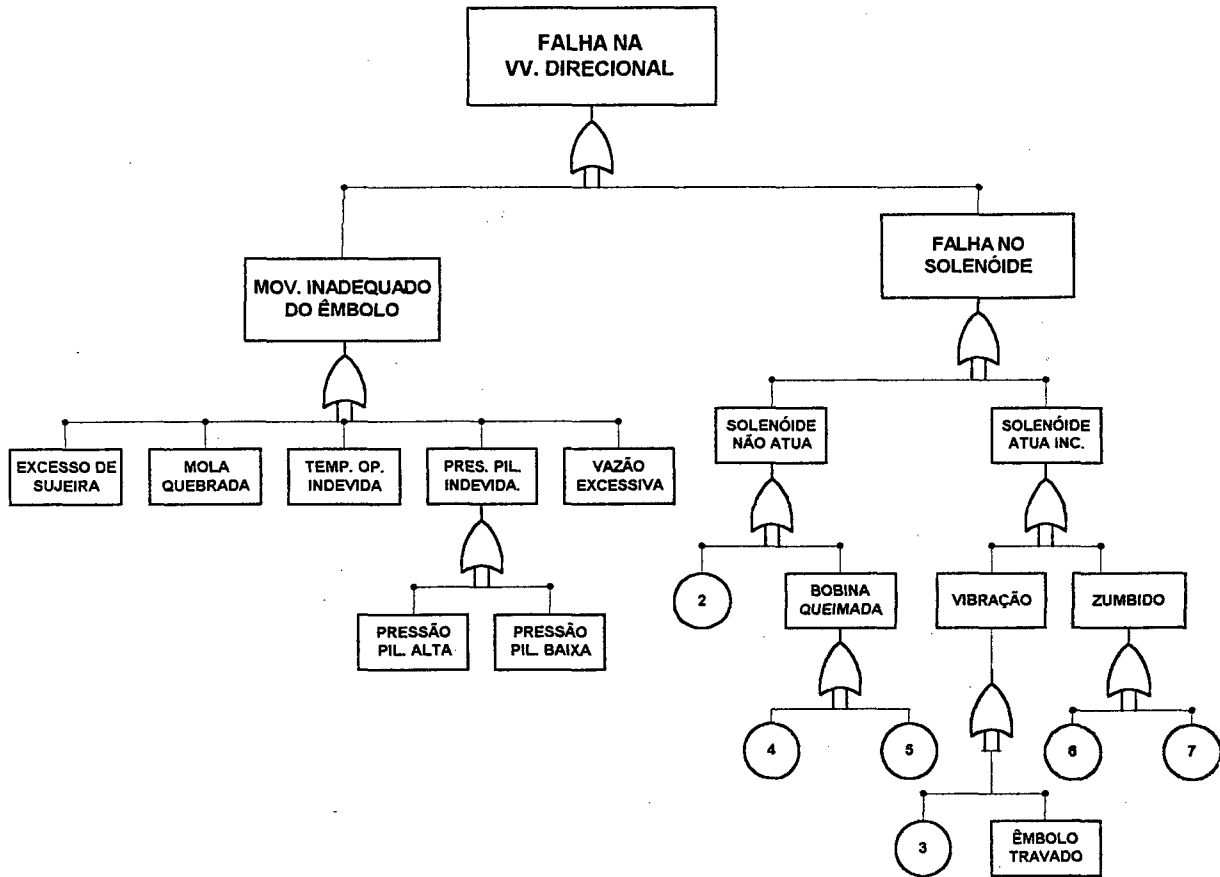


Figura 5.12 – FTA para a válvula direcional (ALVES, 2001).

Através das entrevistas, foram geradas várias árvores de falhas. As árvores de falha obtidas, apresentavam uma estrutura mais horizontal do que vertical, isto é, ocorreram poucos desdobramentos dos níveis hierárquicos. A Figura 5.12 apresenta apenas quatro níveis hierárquicos, sendo que o único evento, do quarto nível hierárquico é a falha êmbolo travado.

A grande maioria dos eventos está relacionada com a porta lógica “ou”. Isso demonstra que a maioria dos eventos, do mesmo nível hierárquico, são independentes e não-mutuamente exclusivos.

As vantagens em se utilizar uma árvore de falhas:

1. O FTA é uma ferramenta muito simples de se utilizar. Para sua construção, parte-se do evento indesejado e são levantadas todas as causas que estão diretamente ligadas a este evento. Depois se repete o processo para os níveis seguintes. O engenheiro de conhecimento aprendeu usar a árvore de falhas com alguns

materiais que foram fornecidos e algumas reuniões rápidas com o especialista em FTA;

2. Quando a árvore de falhas se torna muito grande, é possível dividi-la em árvores menores sem maiores dificuldades;
3. Possibilita calcular as probabilidades de ocorrência das falhas, conseqüentemente a confiabilidade;
4. As portas lógicas “e” e “ou” facilitam a implementação de regras para o sistema especialista;
5. A estrutura hierárquica da árvore de falhas permite entender e analisar, com facilidade, a seqüência e o relacionamento entre os eventos. Os itens (a), (b) e (c) mostram como interpretar a árvore de falhas.

a) Os eventos que se encontram mais próximo do topo da árvore, estão mais próximos dos efeitos do sistema.

b) Os eventos que se encontram mais próximo da base da árvore, estão mais próximos das causas básicas das falhas.

c) Os eventos com maior probabilidade de ocorrência foram postos mais à esquerda da árvore. Logo, observando os eventos do segundo nível hierárquico da Figura 5.12, é possível organizar as falhas em ordem decrescente de probabilidade de ocorrência: (1) excesso de sujeira, (2) mola quebrada, (3) temperatura de operação indevida, (4) pressão indevida, (5) vazão excessiva.

A principal característica da árvore de falhas é a sua estrutura hierárquica bem definida. Isso facilitou o diálogo com os especialistas, porque representa os eventos de forma gráfica e organizada, tornando as entrevistas mais objetivas e eficazes. Conseqüentemente, aumentou o nível técnico das entrevistas e os especialistas passaram a participar ativamente na construção dos relacionamentos entre as causas e efeitos, corrigindo e dando sugestões. Com o FTA foi possível obter informações mais detalhadas, sobre os mecanismos que conduzem às falhas e os relacionamentos entre causas e efeitos.

5.4.3 Resultados obtidos e comentários

Durante o estágio curricular⁷ iniciou-se o estudo do FTA para relacionar as causas das falhas nos compressores. Embora o FTA seja de fácil utilização, não foi possível obter bons resultados. Após este estudo os motivos ficaram claros, e foram listados a seguir:

a) Os questionamentos que eram feitos aos especialistas não estavam relacionados diretamente a nenhuma árvore de falhas. Como as informações obtidas não estavam relacionadas a nenhuma árvore, estas ficavam dispersas, conseqüentemente estas informações mais tarde acabavam se perdendo ou eram mal interpretadas. Os questionamentos devem seguir as ramificações de uma árvore de falhas (ordem dos acontecimentos), isto é, devem iniciar com algum efeito do sistema e à medida que as causas são identificadas, devem ser incluídas na árvore (Abordagem *top-down*);

b) As árvores de falhas não eram apresentadas aos especialistas. Isso foi erro gravíssimo porque é necessário que os especialistas vejam a árvore de falhas para que possam contribuir de maneira eficaz.

Com esta aplicação, notou-se que a árvore de falhas não identifica as causas das falhas, e sim, ajuda a organizar e estruturar as causas que conduzem a falha, facilitando o trabalho do especialista em organizar seu conhecimento permitindo que seja repassado para outras pessoas.

Com essa aplicação foi possível perceber a grande potencialidade do FTA para sistemas especialistas, por causa da característica de usar portas lógicas, que podem ser representadas por regras e também por relacionar os eventos com uma estrutura hierárquica bem definida.

5.5 Comentários finais

Com a aplicação do FMEA sobre a bomba de engrenagens, foi possível perceber algumas considerações fundamentais. Inicialmente é necessário definir se o nosso objeto de análise será considerado como um componente ou um sistema. Se isso não estiver definido, não é possível fazer a distinção do que é modo de falha e o que é efeito.

Se o objeto de estudo for considerado como um sistema, deve-se selecionar os seus itens constituintes (componentes) e pesquisar as suas respectivas funções e modos de falha. Para um produto como a bomba de engrenagens, fica muito difícil associar funções a seus itens, porque muitas das funções internas da bomba estavam relacionadas com vários itens.

⁷ Estágio curricular: EMBRACO - Empresa Brasileira de Compressores (SAKURADA, 1997).

Se o produto que estiver sendo analisado for considerado como um componente de um sistema, então seus itens constituintes não serão levados em consideração e o produto será tratado como uma “caixa preta”. Isto é, as funções do produto e os seus modos de falha são pesquisados. Posteriormente, busca-se identificar quais os efeitos causados pelos modos de falha.

Ao executar uma análise da bomba de engrenagens como um sistema e posteriormente analisá-la como um componente de sistema hidráulico, permitiu evidenciar o problema com as definições do FMEA (modo de falha, causa e efeito). A grande dificuldade em se usar o FMEA são as suas definições de modo de falha, causas e efeitos.

Os trabalhos a respeito de FMEA encontrados na literatura não deixam claro esse problema. Teoricamente, parece muito simples aplicar as definições utilizadas no FMEA, mas vale ressaltar novamente, nem tudo irá se enquadrar perfeitamente às definições.

Na a última aplicação, bomba como um componente de um sistema hidráulico, a cavitação não foi considerada como um modo de falha. Mas os seus efeitos estavam sendo considerados nos modos de falha “ruído” e “vazão incorreta”. Se esta aplicação do FMEA tivesse sido desenvolvida em alguma empresa de componentes hidráulicos, talvez a classificação adotada seria outra. Provavelmente, a cavitação seria considerada como um modo de falha. O cuidado que se deve tomar nas reuniões de FMEA é não deixar que estas discussões a respeito da classificação das falhas atrapalhem a dinâmica e o relacionamento da equipe. Pois, não será pela classificação que será dada a falha que o produto se tornará mais ou menos confiável. O importante é que a falha seja considerada, e sobre ela sejam tomadas as providências necessárias para sua eliminação, garantindo qualidade e confiabilidade do produto.

Com a aplicação do FMEA sobre a transplantadora de mudas, foi possível concluir que a primeira etapa do desenvolvimento (Definição do modelo físico, dos componentes e das funções), pode ser desenvolvida pelo projetista já que estas informações encontram-se na documentação do projeto. No entanto, a presença de uma pessoa que conheça o FMEA ajuda a esclarecer estas informações escrevendo de uma forma mais específica e eficiente, direcionada a análise das falhas.

Na primeira reunião foi possível efetuar várias etapas, desde a seleção do modelo físico até o levantamento dos efeitos. Mas todas as etapas passaram por mudanças resultando em melhorias. É preciso que haja um amadurecimento da aplicação, e isto só é possível com opiniões de outros participantes e revisões nos formulários. Através das reuniões ganha-se muito conhecimento a respeito do funcionamento do sistema e isto possibilita mudanças das informações, tornando-as mais eficazes e úteis.

A seqüência das etapas descritas não é uma estrutura rígida, ela pode sofrer mudanças. O mais importante que estas etapas estejam na aplicação. Outro detalhe importante é que não seja confundido modo de falha, causa e efeito. Embora um modo de falha possa ser causa de outros modos de falha, antes de tudo ele deve ser considerado como modo de falha e o que será registrado nas causas do modo de falha são as causas básicas, as causas iniciais da falha.

A cada revisão do trabalho foram identificadas melhorias a serem feitas e estas foram implantadas ao longo das reuniões, mostrando que o FMEA é um documento vivo que está em sempre atualizado.

Sugere-se ainda o uso conjunto de outras ferramentas como o diagrama de Ishikawa e a Análise da Árvore de falhas para o acompanhamento do FMEA. Estas ferramentas mostram as características relevantes do projeto e permitem representar graficamente os eventos relacionados às falhas.

Outras mudanças que vierem a ocorrer serão documentadas e registradas, para que no projeto de outras máquinas as informações possam ser consultadas e assim, buscar cada vez mais o desenvolvimento de projetos com maior qualidade e confiabilidade para o cliente.

A aplicação do FTA como ferramenta de representação do conhecimento facilitou a comunicação entre o engenheiro do conhecimento e os especialistas. Por causa da sua estrutura bem organizada, a ferramenta se ajusta muito bem no auxílio para o desenvolvimento de sistemas especialistas.

Capítulo 6

Conclusões e recomendações

6.1 Introdução

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de facilitar o uso das ferramentas para análise de falhas FMEA, FTA e diagrama de Ishikawa. Outras ferramentas, no capítulo 2, foram estudadas para verificar a relação que poderia existir com as ferramentas de análise de falhas, visto que essas ferramentas, como o FTA, são utilizadas para o cálculo da confiabilidade em sistemas.

As ferramentas para cálculo da confiabilidade apresentadas no capítulo 2, permitem calcular a confiabilidade em sistemas complexos (configuração tipo ponte), no entanto, trabalham apenas com dois estados: falha ou sucesso. Muitas vezes essas informações são insuficientes para uma análise mais aprofundada.

O FTA mostrou-se muito mais habilitado a trabalhar com o FMEA do que as ferramentas apresentadas no capítulo 2. Pois, além de permitir calcular a confiabilidade de sistemas, permite trabalhar com os modos de falha identificados pelo FMEA e organizá-los facilitando o rastreamento das falhas.

A principal dificuldade durante o desenvolvimento deste trabalho, foi encontrar materiais bibliográficos que dissertassem a respeito do processo de desenvolvimento das ferramentas de análise de falhas (FMEA e FTA). A maior parte do material encontrado, refere-se apenas a resultados de aplicações executadas nas indústrias ou em ambientes acadêmicos. Diante dessas aplicações, não é possível perceber se houve, ou não, dificuldades no processo de desenvolvimento. Pelo contrário, da maneira como estão apresentados, transmitem uma impressão de que os processos de desenvolvimento do FMEA, se dão de maneira naturalmente simples.

Com este trabalho foi possível identificar as dificuldades dos processos de implantação das ferramentas de análise de falhas. Felizmente, com os estudos de caso, foi possível perceber essas dificuldades de forma clara, o que permitiu buscar soluções e explicações para os problemas.

Outro ponto importante deste trabalho, foi a integração com os membros dos laboratórios UFSC/EMC/NeDIP e UFSC/EMC/LASHIP. O bom relacionamento dentro e fora das reuniões, favoreceu o processo criativo, resultando num grande ganho produtividade e conhecimento, que pode ser traduzido como sinergia, dando incentivo a outros trabalhos a serem realizados.

O fato das ferramentas de análise FMEA, FTA e Diagrama de Ishikawa, trabalharem com causas e efeitos de falha, com diferentes abordagens, as fazem bastante complementares e o uso conjunto é bastante apropriado como era de se esperar.

6.2 Diagrama de Ishikawa

O diagrama de Ishikawa é uma ferramenta muito simples que geralmente é usada para organizar as atividades do *Brainstorming*. No entanto, da mesma forma que o FTA e o FMEA é preciso que se tenha conhecimento do sistema, onde se está fazendo a aplicação.

Ao iniciar a análise da transplantadora de mudas para a aplicação do FMEA, perguntou-se: Como o problema deve ser abordado? Como será definida a função principal?

Este é o típico problema que pode ser facilmente resolvido com o diagrama de Ishikawa. Fazendo uma primeira observação do produto, já desenvolvido em nível de protótipo, perguntou-se quais seriam os efeitos indesejáveis?

Estes, certamente, deveriam estar vinculados aos requisitos de projeto. Contudo por falta de prática, esta consulta não foi feita na hora de definir os efeitos. Após a análise dos diferentes módulos, dois efeitos foram identificados como fundamentais: não condução da muda – logo não planta; e danificação da muda, pode até plantar mas a muda morre.

As figuras 6.1 e 6.2 apresentam os relacionamentos entre as causas que poderiam gerar estes dois eventos. Vê-se que algumas causas estão relacionadas com ambos os efeitos, o que deve ser analisado com mais detalhe.

Os diagramas podem ser gerados a partir do Quadro 5.6. A construção do diagrama de Ishikawa não foi feita formalmente, durante a aplicação na transplantadora de mudas. O levantamento dos fatores que teriam influência, no efeito correspondente a danificação da muda, foi feito verbalmente, sem efetuar nenhum registro. Isso porque as análises estavam sendo realizadas diretamente sobre o protótipo, e julgou-se que todos os componentes importantes do

protótipo estavam sendo considerados. No entanto, foi possível perceber que foi uma consideração errada, pois com relação ao efeito “danificação da muda”, passaram despercebidos o componente responsável pelo posicionamento da muda e também o componente responsável em fechar o sulco. Esses componentes também têm grandes chances de causarem dano às mudas.

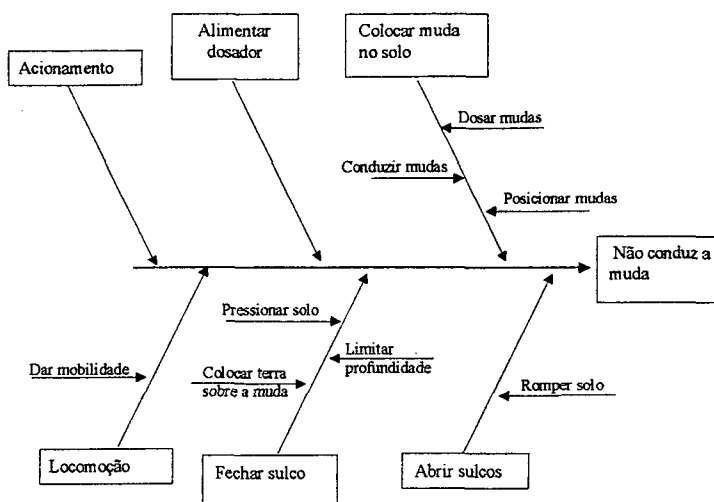


Figura 6.1 – Causas que tem influência no efeito “Não conduz a muda”.

Os diagramas de Ishikawa são indicados para começar uma análise, fornecendo uma visão panorâmica dos problemas. Na etapa do projeto detalhado, a identificação dos componentes que podem causar danos na muda é feita de uma maneira muito simples. A partir das informações colhidas do Quadro 5.6, foram registrados no diagrama, todos os componentes nos quais a muda entra em contato.

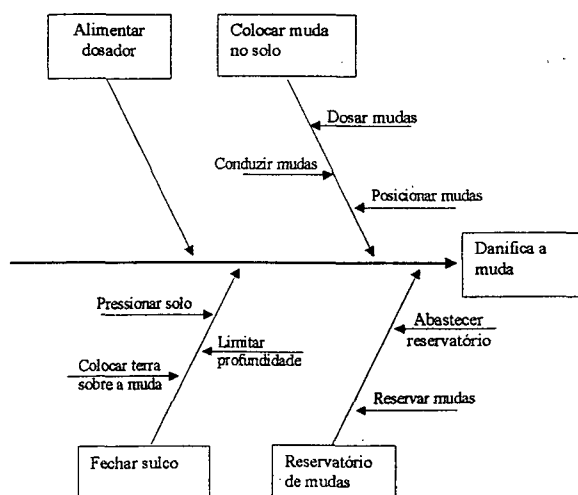


Figura 6.2 – Causas que tem influência no efeito “Danifica a muda”.

A percepção da importância dos diagramas de Ishikawa foi constatada após o FMEA e por isso que está sendo registrado aqui nos comentários. A partir desta análise feita, conclui-se que dois componentes deveriam ser registrados nos formulários FMEA: O condutor final, responsável pelo posicionamento da muda e a roda compactadora, responsável em fechar o sulco.

Isso mostra a importância do diagrama de Ishikawa, em permitir uma rápida visualização dos fatores que tem influência sobre um dado efeito.

6.3 FTA

O FTA é uma ferramenta muito simples de se utilizar. Para sua construção, parte-se do evento indesejado e são levantadas todas as causas que estão diretamente ligadas a este evento. Depois se repete o processo para os níveis seguintes.

O evento de topo de uma árvore de falhas não precisa ser necessariamente um efeito no sistema, também pode ser um modo de falha, dependendo do tipo de análise (no sistema ou no componente).

A Figura 3.4 mostra uma árvore de falhas com dois níveis hierárquicos. Os eventos que estão nos primeiros níveis hierárquicos estão mais próximos do evento de topo, conseqüentemente, estão mais próximos dos efeitos nos sistemas. Os eventos que estão próximos à base da árvore de falhas estão mais próximos das causas básicas das falhas.

ALVES (2001) ainda considerou as chances de ocorrência da falha, colocando os eventos com maiores probabilidades de ocorrência mais à esquerda da árvore.

Essa descrição apresentada, mostra como uma árvore de falhas é organizada, facilitando muito a comunicação entre o engenheiro do conhecimento e um especialista, visto que, a principal característica da árvore de falhas é a sua estrutura hierárquica. Isso resultou em um aumento do nível técnico das entrevistas e os especialistas passaram a participar ativamente na construção dos relacionamentos entre as causas e efeitos, corrigindo e dando sugestões.

As portas lógicas, além de permitir calcular a confiabilidade do sistema, permitem que sejam transformadas em regras para um sistema especialista.

Após montar um conjunto de árvores de falhas a respeito do sistema, a sua implementação para um sistema especialista se torna bem mais simples. E também, um sistema especialista que possua árvores de falhas incorporadas em seu código, permite obter as respostas para os problemas de maneira rápida e direta, porque as perguntas que são feitas para o usuário, vão

seguindo as ramificações e, dependendo das respostas, várias ramificações (possíveis causas) podem ser eliminadas, dado que um modo de falha pode estar em vários pontos, dentro de uma árvore de falhas. Esta sistemática é utilizada no sistema especialista desenvolvido por ALVES (2001).

6.4 FMEA

Muitas publicações demonstram o uso das ferramentas nas indústrias e instituições acadêmicas, nas quais o conhecimento já se encontra sedimentado e padronizado. Desta forma, não se têm dúvidas diante dos casos apresentados, pois são casos em que as definições utilizadas no FMEA (modo de falha, efeito e causa) se ajustam perfeitamente. Isto nos leva a falsa impressão de que todos os casos, em que for utilizada a ferramenta, se darão de uma maneira naturalmente simples.

O processo de desenvolvimento de um FMEA é um processo iterativo, como uma metodologia de projeto e precisa ser constantemente revisto e realimentado.

A grande dificuldade está no processo de implantação das ferramentas, quando ainda não estão definidos o que são os modos de falhas, causas e efeitos. Para cada sistema é necessário definir: modo de falha, efeito e causa do modo de falha.

Vale ressaltar aqui, que nem sempre a falha irá se ajustar às definições. Um exemplo, da dificuldade em classificar as falhas foi observado no estudo de caso da bomba de engrenagens, mais especificamente analisando a cavitação. Ao tentar classificar a falha de forma rigorosa e inflexível, em cada definição, é a primeira etapa para uma grande discussão e desentendimento. Pois, nem todos os eventos podem ser enquadrados nestas classificações. As definições encontradas de modos de falha, causas e efeitos são bastante simples, e por causa disso, induzem a uma falsa idéia de que a etapa de classificação das falhas se dará de maneira simples.

Diante dessa dificuldade, começa a se questionar: A ferramenta está sendo utilizada de maneira correta? O estudo da ferramenta foi suficiente? A equipe que foi selecionada está capacitada? Dado a isso, deve-se ter em mente que a classificação das falhas não é uma tarefa simples e que esta muda de acordo com o sistema e do interesse da equipe FMEA. O importante é que a falha seja considerada na análise. O fato de uma falha ser classificada como modo de falha, efeito ou causa não terá influências na sua confiabilidade.

Em resumo, para executar um FMEA, deve-se ter bem claro:

- Qual o sistema que está sendo analisado?
- Quais são os componentes relevantes?
- Listar as funções dos componentes.
- Obtenção de desenhos, diagramas, modelos confiabilísticos para representação gráfica do sistema.
- Quais os modos de falha dos componentes? Os modos de falha são baseados nas funções e especificações dos componentes.
- Quais são os efeitos que ocorrem no sistema? Os efeitos são baseados nas funções e especificações do sistema.

Estas seis etapas apresentadas são as mais importantes do FMEA.

6.5 Conclusões

O processo de desenvolvimento de um FTA é bastante simples e, geralmente, será desenvolvido depois de um FMEA, pois é necessário que se tenha bastante conhecimento, do comportamento do sistema, para desenvolver a árvore. As etapas iniciais do FMEA envolvem a identificação do sistema, componentes, funções, a utilização de diagramas e modelos, análises dos modos de falhas, efeitos e causas. Após desenvolver estas etapas, pode-se dizer que se obteve um bom conhecimento do sistema.

Com a aplicação do FTA no estudo de caso, pode-se concluir que o FTA não identifica as causas das falhas, e sim, ajuda a organizar e estruturar as causas que conduzem a falha, facilitando o trabalho do especialista em organizar seu conhecimento, permitindo que seja repassado para outras pessoas.

A entrevista é um processo de aquisição de conhecimento que fica bastante facilitado, quando em paralelo, é desenvolvido um FTA. É fundamental que o especialista (entrevistado) acompanhe o desenvolvimento do FTA.

As ferramentas de análises de falhas devem ser utilizadas de maneira sistemática, seguindo cuidadosamente cada etapa e lembrando que à medida que o conhecimento é adquirido, este é incorporado dentro das ferramentas. A documentação é muito importante, é baseado nestes históricos que os programas de manutenção, testes, programas de capacitação serão desenvolvidos.

O diagrama de Ishikawa é a ferramenta mais indicada para iniciar uma análise, por fornecer uma visão panorâmica do problema. O FTA é ideal para a representação do conhecimento e a utilização do FMEA permite obter o conhecimento do sistema.

Os estudos de casos apresentados demonstraram a facilidade de uso das ferramentas e ganhos obtidos pelos usuários. As observações incorporadas dentro dos estudos de caso destacaram os problemas relacionados às ferramentas de análise, principalmente com relação ao FMEA.

As seis primeiras etapas do FMEA são fundamentais para a eficiência da aplicação. O que não se deve fazer, na utilização do FMEA, é tentar classificar as falhas de maneira rígida dentro de uma definição (modo de falha, efeito, causa). Vale lembrar que, muitas vezes a falha não irá se adequar perfeitamente às definições propostas, no entanto, esta deve ser considerada e sobre ela deve-se tomar as devidas providências.

Pode-se concluir, finalmente, que os objetivos iniciais propostos foram contemplados neste trabalho. As descrições, apresentadas nos processos de análise com os respectivos estudos de casos, proporcionaram, pelo menos ao autor deste trabalho, uma visão e uma crítica dos textos citados nas referências bibliográficas. A maioria dos textos, ou apresentavam um receituário de aplicação ou um resultado de aplicação. Isto posto, permite compreender a dificuldade da aplicação dessas ferramentas em nível de “chão de fábrica”.

Embora, não tenha sido apresentado explicitamente, como usar as ferramentas em cada fase do processo de projeto, entende-se que a proposição inicial foi atingida. Isso porque os estudos de caso contemplaram o uso do FMEA, num produto que estava sendo desenvolvido. Foi aplicado na fase do projeto detalhado e construção do protótipo, mas gerou informações que proporcionaram revisões de projeto. O FMEA foi usado também num produto comercial, a bomba de engrenagens. Permitiu conhecer, mais detalhadamente, os diferentes aspectos associados às funções, falhas e efeitos, com vistas a aprimorar o projeto para a manutenibilidade. E, finalmente, o FTA, por ser uma ferramenta de representação do conhecimento, auxiliou o processo de desenvolvimento de um sistema especialista, visando a manutenção, na tarefa de aquisição do conhecimento. Aspecto este, importante, para o projeto informacional.

6.6 Recomendações

As recomendações para trabalhos futuros:

1) Os índices de severidade, ocorrência e detecção, do FMECA, geralmente são adotados de tabelas prontas. Um estudo mais aprofundado deveria ser feito, para identificar os parâmetros necessários e importantes para gerar as tabelas, permitindo que as empresa possam criar as suas próprias tabelas de referência, adequadas às suas características e metas.

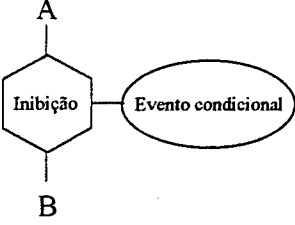
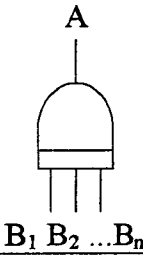
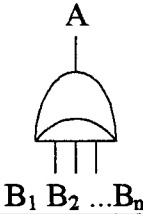
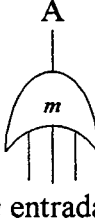
2) O desenvolvimento de um software para integrar as informações oriundas do projeto (funções e especificações) para auxiliar a pesquisar os modos de falhas e a partir disto, gerar as árvores de falhas e formulários FMEA/FMECA. O software deveria permitir incorporar as informações de campo, como taxa de falhas em um banco de dados para cálculo da confiabilidade. Tendo um serviço informatizado, o desenvolvimento dos FMEA/FMECAs e FTAs seria executado em menos tempo, facilitaria o trabalho de atualização dos formulários e também o desenvolvimento das árvores de falhas.

3) Desenvolver estudos e propor ferramentas para facilitar a consideração dos resultados do FMEA/FTA, com as ferramentas de definição das necessidades e requisitos de engenharia, por exemplo, o QFD.

ANEXOS

Os quadros 1 e 2 apresentam algumas portas lógicas e símbolos utilizados para representar eventos. Estes símbolos não são usados com muita frequência, por este motivo foram colocados neste apêndice.

Quadro 1 – Portas lógicas (HENLEY e KUMAMOTO, 1981).

Símbolo	Nome	Relação causal
	INIBIÇÃO	O evento de entrada “B” causa o evento de saída “A” quando o evento condicional ocorrer.
	E PRIORIDADE	O evento de saída “A” ocorre se todos os eventos de entrada ocorrerem na ordem da esquerda para a direita, isto é, inicialmente B ₁ depois B ₂ e assim por diante até o último evento de entrada B _n .
	OU EXCLUSIVO	O evento de saída ocorre se somente um dos eventos ocorrer.
	<i>m</i> DE <i>n</i> entradas	O evento de saída “A” ocorre se pelo menos <i>m</i> dos <i>n</i> eventos de entrada ocorrer.

A porta lógica “INIBIÇÃO”, é representada pelo hexágono que possui ao seu lado um símbolo representando o evento condicional. A ocorrência do evento condicional com o evento de entrada “B”, faz com que o evento de saída “A” ocorra. É semelhante a uma porta lógica “E”, no entanto neste caso é possível usar as probabilidades de ocorrência do evento condicional, ou seja, o evento de entrada “B” causa o evento de saída “A” com a probabilidade de ocorrência do evento condicional (geralmente constante).

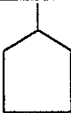
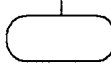
A porta lógica “E PRIORIDADE” também funciona como uma porta lógica “E”, com a diferença de que os eventos de entrada devem ocorrer em uma ordem predeterminada para que o evento de saída ocorra. A convenção utilizada para a ordem de ocorrência dos eventos de entrada

é da esquerda para a direita. Observando a figura, para que o evento de saída ocorra é necessário que os eventos de entrada sigam a seguinte ordem: Primeiro ocorre o evento B_1 , seguido de B_2 e assim por diante, até o evento B_n .

O evento de saída “A” na porta lógica “OU EXCLUSIVO”, ocorre se apenas um dos eventos de entrada ocorrer. O evento de saída não acontece se ocorrer mais de um evento de entrada.

A porta lógica “m De n”, é usada para mostrar os casos em que é necessário ocorrer um número mínimo de eventos de entrada para que ocorra o evento de saída “A”.

Quadro 2 – Representação de eventos (HENLEY e KUMAMOTO, 1981).

 casa	Evento casa. Ocorre ou não.
 oval	Evento condicional usado com a porta lógica “inibição”.

A símbolo para o evento “casa” é usado em um evento que normalmente se espera que ocorra, neste caso é chamado de ligado, quando não vai ocorrer é chamado de desligado (DE CICCIO e FANTAZZINI, 1988). Este evento pode ser usado de outra maneira, segundo HENLEY e KUMAMOTO (1981), algumas vezes deseja-se examinar casos especiais de uma árvore de falhas forçando a ocorrência de alguns eventos e a não ocorrência de outros. Quando o evento casa é escolhido como ligado, a árvore de falhas interpreta como um evento que vai ocorrer e quando é escolhido como desligado o evento não vai ocorrer.

O evento condicional, é usado junto com a porta lógica inibição. Este símbolo indica ou estipula restrições.

Construção da árvore de falhas a partir do método do grupo de corte

O método do grupo de corte é usado para reduzir um sistema de configuração complexa (tipo ponte), Figura 2.6, em um sistema de configuração simples (série/paralelo), Figura 2.7. A partir deste sistema reduzido é possível desenvolver a árvore de falhas a seguir, Figura 1.

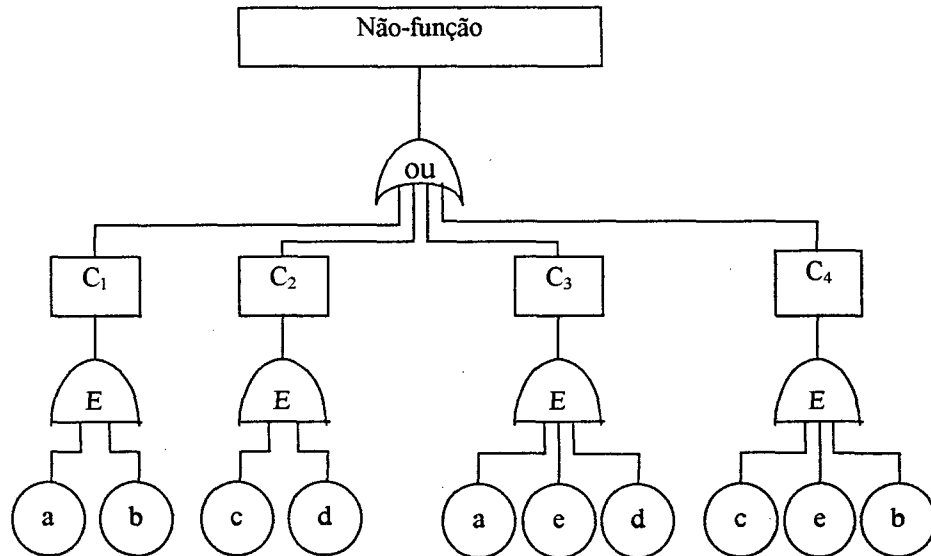


Figura 1 – Árvore de falhas a partir do sistema obtido pelo grupo de corte.

A “saída” do sistema na Figura 2.6 é a função que este deve desempenhar. O sistema não desempenha sua função, ou não alcança a “saída”, se ocorrer a falha de qualquer um dos Grupos de Corte (C_1 , C_2 , C_3 ou C_4). Desta forma, pode-se dizer que o evento indesejável ou evento de topo é a não-função do sistema.

Toda árvore de falhas gerada a partir de um sistema reduzido pelo método do grupo de corte será composta por dois níveis hierárquicos apenas. O primeiro nível hierárquico é formado pelos grupos de corte os quais estão conectados ao evento de topo através de uma porta lógica “OU”, isto porque os grupos estão conectados em série.

O segundo nível hierárquico é formado pelos componentes de cada grupo de corte, sendo conectados ao primeiro nível através de um conjunto de portas lógicas “E”, visto que os componentes dentro de cada grupo, estão conectados em paralelo. Como foi visto anteriormente, para que um dado grupo de corte falhe é preciso que ocorra a falha de todos os seus componentes.

Como os componentes de cada grupo de corte estão relacionados pela porta lógica “E”, interseção, a probabilidade de falha de cada grupo de corte, $P(Q_{Ci})$, é calculada como o produto das probabilidades de falha de seus elementos constituintes:

$$P(Q_{c1}) = Q_a \cdot Q_b$$

$$P(Q_{c2}) = Q_c \cdot Q_d$$

$$P(Q_{c3}) = Q_a \cdot Q_d \cdot Q_e$$

$$P(Q_{c4}) = Q_b \cdot Q_c \cdot Q_e$$

A probabilidade de falha do sistema, Q_s , é calculada pela união das probabilidades de falha dos grupos de corte, equação (3.4):

$$Q_s = P(Q_{c1} \cup Q_{c2} \cup Q_{c3} \cup Q_{c4}) = P(Q_{c1} + Q_{c2} + Q_{c3} + Q_{c4})$$

$$\begin{aligned} Q_s = & P(Q_{c1}) + P(Q_{c2}) + P(Q_{c3}) + P(Q_{c4}) - P(Q_{c1} \cap Q_{c2}) \\ & - P(Q_{c1} \cap Q_{c3}) - P(Q_{c1} \cap Q_{c4}) - P(Q_{c2} \cap Q_{c3}) - P(Q_{c2} \cap Q_{c4}) \\ & - P(Q_{c3} \cap Q_{c4}) + P(Q_{c1} \cap Q_{c2} \cap Q_{c3}) + P(Q_{c1} \cap Q_{c2} \cap Q_{c4}) \\ & + P(Q_{c1} \cap Q_{c3} \cap Q_{c4}) + P(Q_{c2} \cap Q_{c3} \cap Q_{c4}) - P(Q_{c1} \cap Q_{c2} \cap Q_{c3} \cap Q_{c4}) \end{aligned}$$

$$P(Q_{c1} \cap Q_{c2}) = P(Q_{c1}) \cdot P(Q_{c2}) = Q_a \cdot Q_b \cdot Q_c \cdot Q_d \quad (A \cap B \neq 0, \text{Eventos não-mutuamente exclusivos})$$

$$P(Q_{c1} \cap Q_{c3}) = P(Q_{c1}) \cdot P(Q_{c3}) = Q_a \cdot Q_b \cdot Q_d \cdot Q_e$$

$$P(Q_{c1} \cap Q_{c4}) = P(Q_{c1}) \cdot P(Q_{c4}) = Q_a \cdot Q_b \cdot Q_c \cdot Q_e$$

$$P(Q_{c2} \cap Q_{c3}) = P(Q_{c2}) \cdot P(Q_{c3}) = Q_a \cdot Q_c \cdot Q_d \cdot Q_e$$

$$P(Q_{c2} \cap Q_{c4}) = P(Q_{c2}) \cdot P(Q_{c4}) = Q_b \cdot Q_c \cdot Q_d \cdot Q_e$$

$$P(Q_{c3} \cap Q_{c4}) = P(Q_{c3}) \cdot P(Q_{c4}) = Q_a \cdot Q_b \cdot Q_c \cdot Q_d \cdot Q_e$$

$$\begin{aligned} P(Q_{c1} \cap Q_{c2} \cap Q_{c3}) &= P(Q_{c1} \cap Q_{c2} \cap Q_{c4}) \\ &= P(Q_{c1} \cap Q_{c3} \cap Q_{c4}) \\ &= P(Q_{c2} \cap Q_{c3} \cap Q_{c4}) \\ &= P(Q_{c1} \cap Q_{c2} \cap Q_{c3} \cap Q_{c4}) = Q_a \cdot Q_b \cdot Q_c \cdot Q_d \cdot Q_e \end{aligned}$$

Vale fazer a observação que o componente “e” aparece tanto no grupo de corte C_3 como no grupo de corte C_4 .

$$\text{Então,} \quad P(Q_{c3} \cap Q_{c4}) = P(Q_{c3}) \cdot P(Q_{c4}) = Q_a \cdot Q_b \cdot Q_c \cdot Q_d \cdot Q_e$$

$$\text{e não,} \quad P(Q_{c3} \cap Q_{c4}) = P(Q_{c3}) \cdot P(Q_{c4}) = Q_a \cdot Q_b \cdot Q_c \cdot Q_d \cdot (Q_e)^2$$

A parcela Q_e não deve ser elevada ao quadrado porque se trata do mesmo componente. Se for considerado ao quadrado, estaria sendo computado mais um componente “e” no sistema. Então, é muito importante, antes de iniciar o cálculo da árvore de falhas, verificar os componentes que estão repetidos em outros grupos de corte.

Portanto,

$$Q_s = Q_a \cdot Q_b + Q_c \cdot Q_d + Q_a \cdot Q_d \cdot Q_e + Q_b \cdot Q_c \cdot Q_e - Q_a \cdot Q_b \cdot Q_c \cdot Q_d - Q_a \cdot Q_b \cdot Q_d \cdot Q_e - Q_a \cdot Q_b \cdot Q_c \cdot Q_e - Q_a \cdot Q_c \cdot Q_d \cdot Q_e - Q_b \cdot Q_c \cdot Q_d \cdot Q_e + 2 \cdot Q_a \cdot Q_b \cdot Q_c \cdot Q_d \cdot Q_e \quad (1)$$

e a confiabilidade é dada por:

$$R_s = 1 - Q_s \quad (2)$$

Com pode ser observado, as equações que são usadas para o cálculo da probabilidade de falha para o método do grupo de corte acabam sendo as mesmas.

Algumas sugestões para a formação de equipes de FMEA.

STAMATIS (1995) propõe algumas formações quanto aos integrantes de uma equipe FMEA:

Quadro 1 – Equipe de um FMEA de sistema:

Engenheiro de sistema (obrigatório);	Engenheiro de materiais;
Engenheiro de projeto (obrigatório);	Representante de pesquisa e desenvolvimento;
Engenheiro de teste;	Engenheiro de processo;
Representante de marketing;	Engenheiro de serviço de campo;
Engenheiro de qualidade;	Engenheiro de produto;

Quadro 2 – Equipe de um FMEA de projeto:

Engenheiro de sistema (obrigatório);	Representante de marketing;
Engenheiro de processo (obrigatório);	Engenheiros de qualidade;
Engenheiro de projeto (obrigatório);	Representante de pesquisa e desenvolvimento;
Engenheiro de confiabilidade;	Engenheiro de serviço de campo;
Engenheiro de teste;	Engenheiro de produto;
Engenheiro de materiais;	Engenheiro de ferramentas;

Quadro 3 – Equipe de um FMEA de processo:

Engenheiro de projeto (obrigatório);	Engenheiro de ferramentas;
Engenheiro de processo (obrigatório);	Representante de marketing;
Operador representando o pessoal (obrigatório);	Engenheiro de materiais;
Engenheiro de qualidade;	Engenheiro de serviço de campo;
Engenheiro de confiabilidade;	Engenheiro de produto;

PALADY (1997) sugere a seguinte lista de representantes para o time FMEA, salientando que não é uma lista fechada:

Quadro 4 – Equipe de um FMEA segundo (PALADY, 1997):

Pesquisa e desenvolvimento	Engenharia de Materiais
Engenharia de Projeto	Engenharia de Metodologia
Engenharia de Confiabilidade	Assistência Técnica
Engenharia de Processo	Técnicos
Engenharia de Qualidade	Produção/Manufatura
Manutenção	Embalagem.

Referências Bibliográficas

- ABDUL-NOUR, G., Beaudoin, H., Ouellet, P., Rochette, R., Lambert, S. A reliability based maintenance policy; a case study, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 35, Issues 3-4, December 1998, Pages 591-594.
- ALVES, Guilherme Dionizio. Desenvolvimento de um sistema especialista protótipo para diagnóstico de falhas em um sistema hidráulico naval, Florianópolis: Eng. Mecânica/UFSC, (Dissertação de mestrado), 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. NBR 5462, Confiabilidade e Mantenabilidade - terminologia. Rio de Janeiro, Nov/1994.
- BACK, Nelson, FORCELLINI, Fernando A. Projeto de produtos. Apostila do Curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, 1999.
- BACK, Nelson. Metodologia de Projeto de Produtos Industriais. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1983.
- BARNARD, Raymond F, DOHANICH, Stephen L, HEINLEIN, Philip D. System For Failure Mode And Effects Analysis, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Volume 10, Issue 2, May 1997, Page 172.
- BEN-DAYA, M., RAOUF A. A Revised Failure Mode and Effects Analysis Model, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol 13, N.1, 1996.
- BILLINTON Roy, ALLAN, Ronald N. Reliability Evaluation Of Engineering Systems: Concepts And Techniques. New York and London: Plenum Press, 1987.
- BOSCH - Hidráulica. Teoria e Aplicação da Bosch. Hydraulics Division K6. Departamento de Publicações Técnicas, 1991.
- BULL, D.R., Burrows, C.R., Crowther, W.J., Edge, K.A., Atkinson, R.M., Hawkins, P.G. and Woollons, D.J. Approaches to Automated FMEA of Hydraulic Systems. In Proceedings of the Aerotech 95 Conference, Birmingham, UK, 1995.
- CALCTEC Engenharia LTDA. Disponível em: <<http://www.dhnet.com.br/caltec/>>, Acesso em: Fevereiro 2001.
- CAMPOS, Vicente Falconi, TQC: Controle de Qualidade Total (no estilo japonês), Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1992.
- CARRAFA, Wanilson Martin. Desenvolvimento de uma transplantadora modular acoplável a tratores de rabiças, Florianópolis: Eng. Mecânica/UFSC, (Dissertação de mestrado), 2001.

- CASTRO, Daniel E. Aplicacion De Análisis Fiabilidad Y Rcm Para Solucionar Fallas Críticas En Um Silo De Carbón De Una Indústria Siderúrgica, COCIM-CONAE (IX Congresso Chileno de Ingenieria Mecânica e IV Congreso Nacional de Energia), Cefet-MG- Depto. De Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação de Minas Gerais, 2000.
- CONTINI, S. A new hybrid method for Fault Tree Analysis. *Reliability Engineering and System Safety* 49, 1995.
- DE CICCO e FANTAZZINI. Introdução à Engenharia de Segurança de Sistemas. Editora FUNDACENTRO – Fundação de Jorge Duprat de Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho, São Paulo, 1988.
- DEGUCHI, Akiyoshi, FUJITA, Takaya, NOMOTO, Yuji. Development of a design method for a high-efficiency water pump. Society of Automotive Engineers of Japan Inc. and Elsevier Science B.V., 1999.
- DIAS, ACIRES. Projeto para Confiabilidade e Manutenibilidade - Disciplina de Confiabilidade - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFSC. 1997.
- Dicionário MICHAELIS, Disponível em: <<http://www.uol.com.br/michaelis/>>, 2000.
- EITB - Engineering Industry Training Board. Failure Mode and Effects Analysis, 1986.
- ELLIOTT, Margaret S. Computer Assisted Fault-Tree Costruction Using a Knowledge-Based Approach, *IEEE Transactions of Reliability*, Vol 43, N. 1, 1994 , March.
- FMECA. FMECA.COM, Disponível em: <<http://www.fmeca.com>>.
- FONSECA, Antônio Jorge. Hernandez. Sistematização do Processo de Obtenção das Especificações de Projeto de Produtos Industriais e sua Implementação Computacional, Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, outubro de 2000.
- FORD Motor Company. FMEA training reference guide - forward, 1997.
- HAWKINS, P.G., WOOLLONS, D.J. Failure modes and effects analysis of complex engineering systems using functional models, *Artificial Intelligence in Engineering*, 12 (1998) 375-397.
- HENLEY, E. J., KUMAMOTO, H. Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice-Hall, Inc. 1981.
- HUANG, G. Q., NIE, M., MAK, K. L. Web-based failure mode and effect analysis (FMEA), *Computer & Industrial Engineering* 37, 1999.
- KHAN, Faisal I., ABBASI, S.A. Analytical simulation and PROFAT II: a new methodology and a computer automated tool for fault tree analysis in chemical process industries. *Journal of Hazardous Materials* A75 2000.

- KUME H. Quality Management in New-Product Development: FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), University of Tokyo.
- LATINO, Kenneth C., Failure modes & effects analysis, a modified approach, National Petroleum Refineries Association (NPRA) Maintenance Conference, May 1996.
- LEWIS, E.E. Introduction To Reliability Engineering. New York: John Wiley & Sons, 1987.
- LIN, Ching-Torng, WANG, Mao-Jiun J. Hybrid fault tree analysis using fuzzy sets, Engineering and System Safety 58, 1998.
- LIU, T. I., YANG, X. M. Design for quality and reliability using expert system and computer spreadsheet, Journal of the Franklin Institute 336 (1999).
- MARIBONDO, Juscelino de Faria. Desenvolvimento de uma Metodologia de Projeto de Sistemas Modulares, Aplicada a Unidades de Processamento de Resíduos Sólidos Domiciliares, Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC. Agosto de 2000.
- MIL-STD-1626A. Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, Military Standard, Naval Ship Engineering Center, Washington D.C., 1980.
- MOJENA, Miguel Angel Reyes. Análise e redução de estruturas em confiabilidade. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 1999, 158p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).
- NASA, Lewis Research Center, OSEMA: Office of Safety, Environmental & Mission Assurance, Disponível em: <<http://einstein.lerc.nasa.gov>>, 2000.
- O'CONNOR, P. D. T. Practical Reliability Engineering. 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1985.
- OGLIARI, André. Sistematização da Concepção de Produtos Auxiliada por Computador com Aplicações no Domínio de Componentes Injetados. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC. 1999.
- PALADY, Paul. Análise dos Modos de Falha e Efeitos, Prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram. Instituto IMAM, São Paulo, 1997.
- PAZ, Emilio Bautista, Evaluacion de la Fiabilidad y la Mantenibilidad. Aplicacion al Equipamiento Mecanico, Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación. Universidad Pllitécnica de Madrid, Madrid, España.
- PELÁEZ, C. Enrique, BOWLES, John B., Using Fuzzy Cognitive Maps as a System Model for Failure Mode And Effects Analysis, Information Sciences 88, 177-179 (1996).
- PINNA, T., CAPORALI, R., GAMBI, G., BUGGARZZI, L., POU CET, A., PORFIRI, M. T. Failure Mode And Effect Analysis On Iter Heat Transfer Systems. Fusion Engineering and Design, 1998.

- PRICE, Christopher J. Effortless Incremental Design FMEA, Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1996.
- RAMAKUMAR, R. Engineering Reliability: Fundamentals and Applications. New York: Prentice-Hall International, Inc. 1993.
- REN, Yansong (Jennifer), DUGAN, Joanne Bechta. Design of Reliable Systems Using Static & Dynamic Fault Trees, IEEE Transactions of Reliability, Vol 47, N.3, 1998, September.
- REXROTH Hidráulica Ltda. Treinamento Hidráulico, Apostila de Instrução e Informação sobre a Hidráulica Industrial, 1994.
- REYES, Andrés E. L., VICINO, Silvana R. Qualidade Total - Diagrama de Ishikawa. Disponível em: <<http://pointer.ciagri.usp.br/qualidade/ishikawa/pag1.htm>>, ESALQ, Acesso em: Julho 2000.
- SAE SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS – SAE J1739, Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA) and Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA), Reference Manual, 2000.
- SAKURADA, E. Y. Relatório de Estágio Curricular, EMBRACO, 1997.
- SMITH, Anthony M. Reliability-Centered Maintenance. USA: McGraw-Hill, Inc. , 1993.
- SOUZA, Rubens Antonio de, POSSAMAI, Osmar. Confiabilidade e Falhas de Campo: Uma Metodologia para Suporte ao Projeto. II Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, São Carlos, SP, 30 de Agosto de 2000.
- STAMATIS, D. H. Failure Mode and Effects Analysis: FMEA from Theory to Execution, ASQC Quality Press Milwaukee, Wisconsin, 1995.
- TELECURSO 2000, A biblioteca virtual do estudante brasileiro. Disponível em: <<http://www.bibvirt.futuro.usp.br/acervo/matdidat/tc2000/>>, Acesso em: Fevereiro 2001.
- TENG, S., HO, S. Failure Mode and Effects Analysis: An Integrated Approach for Product Design and Process Control. International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 13 No. 5, pp.8-26, 1996.
- TMEH - Tool And Manufacturing Engineers Handbook, Continuous Improvement, Vol. 7, Chapter 14, USA, Editor: Ramon Bakerjian, CMfgE, 1993.
- VILLACOURT, M. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA): A Guide for Continuous Improvement for the Semiconductor Equipment Industry. SEMATECH Inc. 30 de Setembro de 1992.

VINADÉ, César. Sistematização do Processo de Projeto para confiabilidade e manutenibilidade de produtos com aplicação em sistemas hidráulicos, Florianópolis: Eng. Mecânica/UFSC, (Proposta de tese), 2000.

VOLLERT, João Rosaldo. Confiabilidade e falhas de campo: um estudo de caso para melhoria da confiabilidade de um produto e do reparo, através de um procedimento sistemático de coleta de dados. Florianópolis: Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, 1996. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Produção)