

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Heitor Azuma Kagueiama

**SISTEMATIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE FALHA E
PROJETO PARA CONFIABILIDADE**

Florianópolis

2012

Heitor Azuma Kagueiama

**SISTEMATIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE FALHA E
PROJETO PARA CONFIABILIDADE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Acires Dias, Dr. Eng.

Florianópolis

2012

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

K11s Kagueiama, Heitor Azuma

Sistematização de técnicas de análise de falha e projeto para confiabilidade [dissertação] / Heitor Azuma Kagueiama ; orientador, Acires Dias. - Florianópolis, SC, 2012.

124 p.: il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia mecânica. 2. Projetos - Confiabilidade (Engenharia). 3. Falha de sistema (Engenharia). I. Dias, Acires. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU 621

Heitor Azuma Kagueiama

**SISTEMATIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE FALHA E
PROJETO PARA CONFIABILIDADE**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 02 de março 2012.

Prof. Júlio César Passos, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Prof. Acires Dias, Dr. Eng.
Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Acires Dias, Dr. Eng.
Presidente

Prof. Bernardo Luis Rodrigues de Andrade, Dr. Eng.

Prof. Nelson Back, Ph.D.

Prof. Victor Juliano De Negri, Dr. Eng.

A minha família

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Acires Dias pela orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas Luís Fernando Peres Calil e Eduardo Yuji Sakurada pelo companheirismo e pelas discussões durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do Nedip.

A minha família e amigos pelo incentivo e carinho.

A Luiza Mecabô pela paciência e apoio.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico (CNPq) pelo auxílio financeiro na forma de bolsa de mestrado.

Pode-se utilizar a ocasião da tese [...] para recuperar o sentido positivo e progressivo do estudo, entendido não como coleta de noções, mas como elaboração crítica de uma experiência, aquisição de uma capacidade (útil para o futuro) de identificar os problemas, encará-los com método e expô-los segundo certas técnicas de comunicação.

RESUMO

Em projeto, uma das questões de grande importância é a garantia do bom funcionamento dos sistemas técnicos em todo o ciclo de vida, que deve ser considerada desde as primeiras etapas de projeto até o fim da vida útil. No contexto produtivo atual, o controle sobre a ocorrência de falhas em sistemas é um fator competitivo importante, já que nenhum sistema técnico é capaz de operar dentro das condições esperadas infinitamente. A confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar uma função, ou seja, trata da probabilidade do item passar do estado de operação para o estado de falha. Para desenvolver o projeto para confiabilidade existem procedimentos e um conjunto de técnicas, já conhecidas, com suas vantagens e desvantagens. Com a experiência acumulada na utilização de tais técnicas, é possível perceber que muitas limitações atribuídas à elas ocorrem pela falta de processos de integração entre as mesmas. Dessa forma, o presente trabalho aborda o desenvolvimento de um modelo que sistematiza a integração entre as técnicas de análise de confiabilidade – baseado nas técnicas IDEF0 (*integration definition for function modeling*), FMECA (*failure modes effects and criticality analysis*), CNEA (*causal network event analysis*), redes bayesianas e FTA (*fault tree analysis*). Priorizou-se utilizar estas técnicas por serem amplamente utilizadas no setor acadêmico e industrial, e por complementarem-se na análise de confiabilidade. O trabalho é apresentado dentro do contexto de projeto, mas o objetivo principal é propor uma integração entre as técnicas e exemplificar a partir de um modelo que foi aplicado no sistema hidráulico do leme do navio Itabuna. Com isso, pretendeu-se oferecer aos projetistas e analistas de confiabilidade, uma sistematização para utilizar as técnicas com o fim de facilitar o desenvolvimento do projeto de produto para a confiabilidade.

Palavras-chave: Projeto para confiabilidade. Técnicas de análise de falha. FMECA / CNEA / FTA.

ABSTRACT

In design, one of the most important issues is the technical system's functionality assurance throughout the entire life cycle, which should be considered from the very early stages to the end of its useful life. Considering the current production context, the control over the occurrence of failures in technical systems is an important competitive factor, since no technical system is capable of operating under the specified condition indefinitely. Reliability is defined as the capability of an item to perform a function, in other words, it approaches the probability of an item to pass from its operating state to a failure state. In order to develop a design for reliability there are procedures and a set of well known techniques that provide a variety of advantages and disadvantages. With a certain amount of experience acquired over the use of such techniques, it is possible to identify some limitations as a result of the lack of a failure techniques integration process. As such, this research addresses the development of a model that systematizes the integration of analysis techniques – based on IDEF0 (*integration definition for function modeling*), FMECA (*failure modes effects and criticality analysis*), CNEA (*causal network event analysis*), redes bayesianas e FTA (*fault tree analysis*). These techniques were selected based on their wide use both in the academic and industrial sectors, besides the fact that they complete each other in the reliability analysis. The research is presented under the design context, but the main objective is to present the integration between techniques and exemplify their use on a model applied to analyse the hydraulic system used to steer the rudder of a ship called Itabuna. Thus, it is intended to offer designers and reliability analysts a systematic way to use the failure analysis techniques in order to simplify the development of design for reliability.

Keywords: Design for reliability. Failure analysis techniques. FMEA. CNEA. FTA. Bayesian networks

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos – PRODIP	35
Figura 2.2	Ciclo de vida do produto	41
Figura 3.1	Relação entre os custos da ocorrência de falhas e a fase do ciclo de vida	48
Figura 3.2	Confiabilidade de acordo com o mercado e o produto	50
Figura 3.3	Função densidade de probabilidade	54
Figura 3.4	Relação entre a confiabilidade e a não confiabilidade .	54
Figura 3.5	Exemplos de distribuição de probabilidade aplicadas à confiabilidade	56
Figura 4.1	Desdobramento de funções na análise funcional de produtos	60
Figura 4.2	Desdobramento das atividades no modelo IDEF0 . . .	62
Figura 4.3	Tipos de setas dos diagramas IDEF0	63
Figura 4.4	FMEA funcional	67
Figura 4.5	FMEA estrutural	68
Figura 4.6	Exemplo de tabela de FMEA	69
Figura 4.7	Estrutura da técnica CNEA	71
Figura 4.8	Elementos utilizados na representação gráfica da técnica CNEA	72
Figura 4.9	Estrutura de representação da FTA	73
Figura 4.10	Símbolos para a representação de eventos na FTA . .	74
Figura 4.11	Tipos de ligações em redes causais	76
Figura 4.12	Exemplo de relação entre eventos que não permite o uso de redes bayesianas	77
Figura 5.1	Passos para a aplicação do modelo de análise	82
Figura 5.2	Passos para a definição das funções do sistema	84
Figura 5.3	Relacionamento entre subsistemas de acordo com as falhas funcionais	84
Figura 5.4	Exemplo de sistema técnico	85
Figura 5.5	Exemplo de relacionamento entre subsistemas e componentes	86
Figura 5.6	Exemplo de diagrama CNEA	88
Figura 5.7	Exemplo de relação entre diagrama CNEA e tabela FMEA	88
Figura 5.8	Diagrama de tomada de decisão para a seleção da técnica de análise	90

Figura 5.9	Uso da FTA para o detalhamento de causa-raiz da CNEA	91
Figura 5.10	Aplicação de redes bayesianas nos diagramas CNEA	92
Figura 6.1	Diagrama estrutural do sistema hidráulico de acionamento do leme de navio	98
Figura 6.2	Diagrama hidráulico da máquina do leme	99
Figura 6.3	Desdobramento do SHA em subsistemas	102
Figura 6.4	Análise funcional do SHA para os subsistemas de primeiro nível	103
Figura 6.5	Desdobramento funcional do subsistema de potência	104
Figura 6.6	Causas do diagrama CNEA do subsistema de potência	105
Figura 6.7	Efeitos do diagrama CNEA do subsistema de potência	106
Figura 6.8	Relacionamento entre os CNEAs do subsistema de potência e do subsistema de isolamento	106
Figura 6.9	FTA da causa-raiz “Corrente excessiva”	108
Figura 6.10	Rede bayesiana aplicada à causa “Falha na bomba”	109
Figura 6.11	Tabela de probabilidades condicionais do nó “Vazamento interno”	109

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1	Benefícios, requisitos e consequências do uso de metodologias de projeto	33
Quadro 4.1	Tipos de FMEA	65
Quadro 4.2	Descrição das colunas da tabela FMEA	69
Quadro 4.3	Principais portas lógicas da FTA	74
Quadro 4.4	Álgebra booleana aplicada na FTA	75
Quadro 5.1	Tabela de relacionamento das probabilidades condicionais utilizadas nas redes bayesianas	93
Quadro 6.1	Função global do sistema hidráulico de acionamento (SHA)	101
Quadro 6.2	Tabela de FMEA do subsistema de potência	107

LISTA DE SIGLAS

Siglas das organizações ou unidades organizacionais citadas no texto:

ABS	American Bureau of Shipping
NASA	National Aeronautics and Space Administration / United States of America
NeDIP	Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos
OREDA	<i>Offshore Reliability Data</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

Outras siglas utilizadas no texto:

BTA	<i>Bow-tie analysis</i> (Análise gravata borboleta)
CNEA	<i>Causal network event analysis</i> (Análise de eventos por rede causal)
DFR	<i>Design for reliability</i> (Projeto para confiabilidade)
DoE	<i>Design of experiments</i> (Projeto de experimentos)
ETA	<i>Event tree analysis</i> (Análise por árvore de evento)
FMEA	<i>Failure modes effects and analysis</i> (Análise do modo de falha e seus efeitos)
FMECA	<i>Failure modes, effects and criticality analysis</i> (Análise do modo de falha, efeitos e criticidade)
FTA	<i>Fault tree analysis</i> (Análise por árvore de falha)
IDEFO	<i>Integration definition for function modeling</i>
MCC	Manutenção centrada em confiabilidade
MTBF	<i>Mean time between failure</i> (Tempo médio entre falhas)
MTRR	<i>Mean time to repair</i> (Tempo médio até o reparo)
NPR	Número de prioridade de risco (<i>Risk priority number</i>)

PRODIP	<i>Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos</i>
QFD	<i>Quality function deployment</i> (Desdobramento da função qualidade)
SHA	Sistema hidráulico de acionamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Justificativa	27
1.2	Objetivos	28
1.3	Escopo do trabalho	29
1.4	Estrutura do trabalho	29
2	METODOLOGIA DE PROJETO	31
2.1	Aspectos gerais de projeto e o uso de metodologias	31
2.2	Modelo PRODIP e suas etapas	34
2.2.1	Projeto informacional	35
2.2.2	Projeto conceitual	37
2.2.3	Projeto preliminar	38
2.2.4	Projeto detalhado	39
2.3	Confiabilidade nas fases do ciclo de vida do produto	41
2.3.1	Fase de planejamento e projeto	42
2.3.2	Fase de projeto	42
2.3.3	Fase de implementação	44
2.3.4	Fase de uso	44
2.3.5	Fase de descarte	45
2.4	Considerações finais	45
3	ABORDAGEM SOBRE CONFIABILIDADE	47
3.1	Definição de confiabilidade	50
3.2	Considerações finais	55
4	TÉCNICAS PARA ANÁLISE DE FALHA	59
4.1	Técnicas para análise das funções	59
4.1.1	Análise funcional de produto	60
4.1.2	IDEF0	61
4.2	Técnicas para análise das falhas	64
4.2.1	Análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA)	64
4.2.2	Análise de eventos por rede causal (CNEA)	70
4.2.3	Árvore de falha (FTA)	72
4.2.4	Redes bayesianas	75
4.3	Considerações finais	78
5	USO COMBINADO DAS TÉCNICAS DE ANÁLISE DE FALHA	81

5.1	Definição do escopo de análise	82
5.2	Desdobramento e definição das funções do sistema técnico	83
5.3	Combinação FMEA/CNEA	87
5.4	Detalhamento da análise utilizando as técnicas CNEA/FTA e redes bayesianas	89
5.5	Considerações finais	93
6	APLICAÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE DE FALHA	97
6.1	Contextualização do problema	97
6.2	Definição do escopo de análise, descrição do sistema	98
6.3	Definição das funções do sistema	100
6.4	Aplicação da técnica CNEA	104
6.5	Combinação CNEA/FMEA	106
6.6	Detalhamento da análise	108
6.7	Considerações finais	110
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111
7.1	Resultados e contribuições	113
7.2	Recomendações para trabalhos futuros	115
	REFERÊNCIAS	117

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho aborda questões relacionadas à utilização combinada de técnicas de análise de falha aplicadas na análise de confiabilidade, voltada principalmente ao projeto de produtos.

Juran (1997) define produto, em seu sentido mais amplo, como “o resultado final de qualquer processo”. Assim, quando se fala em projetar um produto, este pode se tratar de um bem (elementos físicos) ou um serviço (um trabalho executado para alguém). Porém, no presente trabalho, produtos serão tratados como elementos físicos.

No projeto de produtos, uma das questões de grande importância é a garantia do bom funcionamento dos sistemas, componentes e processos envolvidos em todo o ciclo de vida, que deve ser considerado desde as primeiras etapas de projeto até o fim da vida útil. O valor de um produto está diretamente relacionado aos seus atributos de qualidade e da própria confiabilidade, uma vez que estes definem o valor percebido pelo consumidor. Segundo Levin & Kalal (2003), nas últimas décadas a confiabilidade exerceu um papel pouco importante nas decisões dos consumidores, dada a falta de conhecimento relacionado aos conceitos de qualidade e confiabilidade. Porém, a tendência é que cada vez mais os consumidores passem a avaliar produtos considerando não apenas preço e qualidade (definida de acordo com a satisfação de suas expectativas relativas aos atributos do produto), mas também a confiabilidade (um dos atributos que influenciam a percepção de qualidade, referente à ocorrência ou não de falhas de operação do produto).

Vale lembrar que nenhum sistema técnico é capaz de operar infinitamente sob as condições estabelecidas em projeto. Todo sistema, componente ou pessoas envolvidas em um processo estão sujeitos a falhar em algum momento e a análise de sua ocorrência deve ser executada o mais cedo possível. Tais falhas podem ser causadas, por exemplo, por falhas de projeto, uso incorreto, erro de manufatura, falha de operação, falta de manutenção, falha normal do ciclo de vida, entre outras.

Portanto, para que um produto seja competitivo, é importante conhecer os detalhes sobre como e porque os sistemas ou componentes empregados em um determinado projeto podem vir a falhar, possibilitando tomar medidas para que as metas de confiabilidade sejam atingidas. De acordo com a OREDA (*Offshore Reliability Data*), a falha de um sistema técnico ocorre quando há a interrupção ou a degradação da habilidade de um item desempenhar suas funções requeridas (SINTEF, 2002). A norma MIL-STD-721C define falha como o evento, ou estado inoperante, no qual um item ou parte dele não apresenta, ou não poderia apresentar, o desempenho previamente es-

pecificado (USA/DOD, 1981). O ABS (*American Bureau of Shipping*) define falha como o estado ou condição no qual um componente deixa de satisfazer alguns aspectos de projeto desejados (ABS, 2004). Segundo a SAE (1999), falha é a forma pela qual uma função é perdida ou comprometida. Finalmente, a definição da NASA estabelece falha como o cessar de uma função ou desempenho adequado (NASA, 2008). Esses conceitos podem ser empregados tanto para um produto, quanto para processos e serviços. Assim, pode-se assumir como uma boa definição para a falha de um sistema técnico quando este deixa de cumprir suas funções de acordo com as especificações definidas em projeto.

A análise de confiabilidade é uma abordagem de engenharia aplicada para se entender como e porque um sistema ou componente falha. Para isso, existem diversas técnicas desenvolvidas, com atributos e limitações variados, que possibilitam a adequação da análise de falha em diferentes áreas do conhecimento. No processo de desenvolvimento do projeto de um produto, de acordo com os objetivos definidos, os sistemas, subsistemas e componentes podem ser submetidos a estudos com diferentes graus de detalhamento, podendo-se utilizar as técnicas de análise para facilitar o trabalho dos analistas.

A grande dificuldade da utilização das técnicas existentes está centrada na complexidade envolvida na organização e adequação da análise e dos resultados obtidos ao sistema em estudo. A análise de confiabilidade é uma atividade que envolve profissionais de áreas de atuação e níveis de conhecimento variados, tornando o seu desenvolvimento complexo, principalmente devido à dificuldade de se chegar a um consenso no levantamento de informações e pela dificuldade de definição das fronteiras que permeiam a análise.

A experiência adquirida com a aplicação de algumas das técnicas na análise de confiabilidade e manutenibilidade nos projetos de pesquisa “Projeto de redução do consumo de combustível em frotas de transporte coletivo” (UFSC/NEDIP, 2007) e “Projeto MitiSF6” (DIAS et al., 2011), desenvolvidos no Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NeDIP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) permitiu perceber que a integração entre as diferentes técnicas, apesar de alguns desafios encontrados, traz grandes benefícios. Pode-se, por exemplo, utilizar a CNEA (*causal network event analysis*) integrada com a FMEA / FMECA (*failure mode and effects analysis / failure mode, effects, and criticality analysis*), como um recurso gráfico que simplifica o entendimento dos especialistas no desenvolvimento da análise dos modos de falha. Outro exemplo é a utilização do IDEF0 (*integrated definition for function modeling*) integrada à FMEA / FMECA para a análise de falha em processos. Além das associações já consolidadas, tais como: FTA (*faut tree analysis*) com ETA (*event tree analysis*) e FTA com FMECA.

As dificuldades de integração entre as técnicas em relação aos resultados obtidos para a análise de falha, voltados à análise de confiabilidade e manutenibilidade, sugeriram que deveria se empreender esforços de pesquisa para melhor sistematizar esta integração, visando mitigar as dificuldades encontradas.

1.1 JUSTIFICATIVA

É possível observar que a literatura tem evidenciado a crescente importância da confiabilidade como um dos atributos essenciais para o sucesso de produtos no mercado consumidor. Dhillon (2005), por exemplo, afirma que a confiabilidade vem exercendo um papel de destaque no projeto de produtos, uma vez que as atividades do dia a dia estão cada vez mais dependentes de seu funcionamento satisfatório.

Em alguns setores da indústria, o desenvolvimento tecnológico ocorre tão rápido que os consumidores costumam trocar produtos por gerações mais avançadas antes que estes deixem de apresentar o desempenho especificado. Yang (2007) ressalta que os consumidores esperam que os produtos operem de forma confiável, na fase de uso de seu ciclo de vida, e que estejam sujeitos ao menor custo de manutenção possível. Porém, pela perspectiva dos fabricantes no ganho de vantagens competitivas, o processo de desenvolvimento de produtos deve ser minimizado, considerando o tempo de desenvolvimento e o custo. Como tais interesses são conflitantes, segundo o autor, existe uma motivação para que os fabricantes integrem programas de confiabilidade ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos de forma otimizada.

A análise de confiabilidade consiste em uma série de tarefas a serem executadas, estabelecidas para atender necessidades de produtos específicos, com o objetivo de alcançar da melhor forma possível as metas estabelecidas para a confiabilidade, mas com a redução dos custos e do tempo para o desenvolvimento dos produtos. Para isso, as tarefas são executadas com o auxílio de técnicas que visam simplificar o processo de desenvolvimento.

Um dos fatores que comprometem a aplicação da análise de confiabilidade no desenvolvimento de produtos é o tempo, dada a complexidade envolvida na execução das tarefas. Vale destacar que atualmente as empresas vem se deparando com a constante redução nos ciclos de desenvolvimento de produtos, o que vem comprometendo a análise de confiabilidade durante o projeto (LEVIN; KALAL, 2003).

É importante ressaltar ainda que, devido ao envolvimento de pessoas de diversas áreas de conhecimento dentro da empresa no desenvolvimento de produtos, a comunicação entre os membros da equipe de projeto, por vezes,

torna-se um pouco complexa. Os modelos passam por constantes alterações ao longo do processo, o que torna essencial fazer uso de técnicas e métodos que facilitem o entendimento e a comunicação entre os envolvidos.

Assim, torna-se importante sistematizar o processo de análise de confiabilidade para que esta seja aplicada de forma adequada no desenvolvimento de produtos. Para isso, é recomendável fazer uso das mais variadas técnicas e ferramentas para auxiliar a análise, buscando-se simplificar o processo além de reduzir o tempo e o custo envolvidos. Apesar de existir uma vasta documentação que trata sobre a análise de confiabilidade e das técnicas comumente aplicadas na análise de falha, é possível constatar que o uso combinado das mesmas com o objetivo de melhorar o entendimento e detalhar o processo de ocorrência de falhas no sistema em análise é pouco presente na literatura. Com isso, observou-se a necessidade de pesquisar e formalizar o conhecimento que envolve este uso combinado, visando esclarecer alguns pontos que comprometem a melhoria da confiabilidade no desenvolvimento de produtos.

1.2 OBJETIVOS

Diante do que foi exposto, o objetivo geral deste trabalho é estudar as técnicas, estruturá-las de forma adequada para seu uso combinado e dissertar sobre o conhecimento adquirido, na perspectiva de prover maior racionalidade na integração de técnicas de análise de confiabilidade, facilitando o entendimento dos analistas e a adequação da análise ao sistema/processo em estudo.

Para que o objetivo geral do presente trabalho seja alcançado, alguns objetivos específicos foram definidos, a saber:

- estudar o processo de análise de confiabilidade e detalhar as ações que o permeiam;
- estudar as técnicas empregadas na análise de falha, identificando suas vantagens e desvantagens;
- selecionar as técnicas que possam ser melhor integradas para análise de confiabilidade;
- identificar maneiras de combinar diferentes técnicas para sanar suas limitações, permitindo a obtenção de informações mais detalhadas e melhor organizadas sobre os sistemas em estudo;
- estabelecer um modelo que sistematize a análise de confiabilidade a partir da combinação das técnicas de análise de falha; e

- aplicar o modelo proposto em um sistema técnico, possibilitando sua avaliação.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

Como na etapa de projeto de um produto existe pouca disponibilidade de informações que permitam mensurar a confiabilidade, o presente trabalho tem o foco na análise qualitativa. Com isso, pretende-se formalizar o conhecimento sobre o uso de algumas técnicas para que o projetista possa obter um modelo preliminar do produto e que, na medida que os dados estatísticos estejam disponíveis, os resultados obtidos com o modelo sejam refinados.

O conhecimento sobre a parte quantitativa da confiabilidade (tratado brevemente no Capítulo 3) pode ser considerado bastante consolidado na literatura e, por esta razão, será tratado a partir das referências principais existentes. Porém, é possível observar que ainda existe a necessidade de se esclarecer alguns conceitos e procedimentos para uso integrado de algumas técnicas utilizadas para modelar os sistemas em análise.

É importante destacar ainda que, como o objetivo não é tratar do projeto de produtos como um todo, será utilizado um modelo de referência para orientar o projeto para confiabilidade. Além disso, o modelo proposto neste trabalho de dissertação será aplicado a um sistema técnico já existente, uma vez que o desenvolvimento de um produto não está em seu escopo e que desta forma, é possível avaliar a proposta de forma mais objetiva.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, cujos títulos e respectivos conteúdos são:

- **Capítulo 1 - Introdução:** apresenta os objetivos e algumas definições gerais da pesquisa, contextualizando o trabalho.
- **Capítulo 2 - Metodologia de Projeto:** apresenta conceitos relacionados à metodologias de projeto, em especial a metodologia PRODIP que serve de referência para o desenvolvimento do trabalho, em relação ao projeto de produto.
- **Capítulo 3 Abordagem sobre confiabilidade:** neste capítulo são apresentados os conceitos que envolvem a análise e o projeto para confiabilidade, visando identificar a importância e onde as técnicas de análise

de falha estudadas no presente trabalho podem ser aplicadas.

- **Capítulo 4 - Técnicas para análise de falha:** apresenta as técnicas aplicadas na análise de confiabilidade estudadas no trabalho, buscando-se identificar suas vantagens e desvantagens.
- **Capítulo 5 - Uso combinado das técnicas de análise falha:** apresenta uma proposta que estrutura a utilização combinada das técnicas de análise de falha.
- **Capítulo 6 - Aplicação do modelo de análise de falha:** apresenta a aplicação do modelo resultante da pesquisa em um sistema técnico.
- **Capítulo 7 - Conclusões:** são apresentadas as conclusões resultantes da pesquisa e algumas considerações sobre possíveis desdobramentos da pesquisa em trabalhos futuros.

2 METODOLOGIA DE PROJETO

A etapa de projeto no desenvolvimento de um produto é um processo complexo e oneroso – em tempo e recursos –, para satisfazer os atributos que levarão ou não ao sucesso de mercado. Segundo Weustink et al. (2000), “o processo de projeto consiste em uma série de tomadas de decisões que levarão à definição de um produto completo que representa um objeto a ser fabricado”. Bertsche (2008, p. 407) afirma ainda que o projeto “é a fase mais importante para o desenvolvedor do produto, pois é a fase na qual o produto é planejado, desenvolvido e todos os detalhes relativos a este devem ser abordados”. Juran (1997, p. 166), por sua vez afirma que “o projeto de produtos é o processo de definição das características dos mesmo, exigidas para a satisfação das necessidades do clientes”. Por fim, Back et al. (2008, p. 6) estabelecem a definição de projeto de produto, a qual será adotada como referência pra o desenvolvimento deste trabalho, da seguinte forma:

Projeto é uma atividade predominantemente cognitiva, fundamentada em conhecimento e experiência, dirigida à busca de soluções ótimas para produtos técnicos, a fim de determinar a construção funcional e estrutural e criar documentos com informações precisas e claras para a fabricação.

2.1 ASPECTOS GERAIS DE PROJETO E O USO DE METODOLOGIAS

Os atributos de um produto estabelecidos essencialmente durante a etapa de projeto definem se este é capaz de superar tecnicamente seus concorrentes e se o produto satisfaz as necessidades dos clientes, estabelecendo, desta forma, o seu desempenho na disputa pelo mercado. Sendo assim, é exigido das empresas a busca constante pela excelência no desenvolvimento de seus produtos.

Empresas japonesas, por exemplo, chamam atenção pelo desenvolvimento de diferentes aplicações dos produtos novos, principalmente em produtos não-militares (JURAN; GODFREY, 1998). Em comparação com produtos militares, o setor civil não está sujeito a condições de operação tão rigorosas e, normalmente, estão sujeitos a requisitos de qualidade e confiabilidade menos exigentes. Entretanto, a demanda do setor civil é maior, tornando mais fácil que empresas se estabeleçam no desenvolvimento de produtos dentro deste setor.

É possível constatar ainda que atualmente há um grande nivelamento tecnológico – que faz com que empresas concorrentes sejam igualmente capazes de produzir um mesmo produto –, além de um aumento considerável dos requisitos de qualidade, funcionalidade dos produtos e da complexidade devido ao avanço tecnológico (KIMURA et al., 2007). Assim, encontrar formas de manter ou até aumentar a qualidade e a confiabilidade dos produtos vem se tornando cada vez mais importante – idealmente, avaliações da qualidade e da confiabilidade devem ser realizadas simultaneamente ao processo de projeto.

Não basta desenvolver um produto inovador sem considerar, por exemplo, os custos envolvidos em sua produção, a complexidade envolvida na sua utilização ou a complexidade para a fabricação ou montagem. Ou então, lançar um produto no mercado que pode falhar durante a utilização e trazer riscos à saúde dos usuários. Segundo Weustink et al. (2000), por exemplo, 75% dos custos dos produtos são definidos durante o projeto que, segundo Back et al. (2008), representa apenas 5% dos custos de seu ciclo de vida. Os demais 25% dos custos estão relacionados, por exemplo, com matérias-primas, produção, logística, mercado, entre outros. Desta forma, pequenas diferenças em aspectos como preço, qualidade, desempenho e confiabilidade, cuja maior parte são definidas durante o projeto, também podem resultar no sucesso ou no fracasso do produto.

Com a exigência em considerar todos estes fatores que influenciam o processo de desenvolvimento de produtos, cada vez mais é possível observar uma certa deficiência no processo, principalmente devido à falta de estrutura. Em face disso, o desenvolvimento de produtos pode se tornar lento, trazer desperdícios onerosos, enfrentar mudanças de projeto e crises internas imprevisíveis, além de outros problemas (JURAN, 1997).

De fato, Kuo et al. (2001) ressaltam que o projeto de um produto costuma ser desenvolvido puramente com base nas considerações sobre sua funcionalidade, para então ser encaminhado de forma sequencial a outros departamentos dentro da empresa – como de planejamento de processo, manufatura e assim por diante –, sem que o projetista receba qualquer retorno de tais departamentos. Porém, em alguns casos, pode-se constatar que o produto projetado vem a ser extremamente complexo de ser fabricado, tornando seus custos desnecessariamente elevados. Portanto, é importante que durante a etapa de projeto do produto, sejam considerados não só atributos funcionais mas os aspectos relevantes para todas as etapas de seu ciclo de vida – projeto, fabricação, uso e descarte.

Este aspecto é ressaltado pela complexidade de fabricação decorrente de projeto não aderente ao processo fabril, resultando em implicações diretas sobre falhas de funcionamento. Em grande parte, estas falhas se refletem na fase inicial do ciclo de vida (falhas de juventude) e, por vezes, tornam-se

recorrentes em todo o ciclo de vida (DIAS, 2008).

Desta forma, a utilização de uma metodologia aumenta a probabilidade de sucesso no desenvolvimento de produtos, pois permite estruturar o processo e assegurar que todo seu ciclo de vida seja considerado de forma integrada durante o projeto – desde o desenvolvimento, passando pela fase de uso até o descarte –. É possível ainda citar outros benefícios, assim como requisitos/consequências da utilização de uma abordagem estruturada no desenvolvimento de produtos, conforme o Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Benefícios, requisitos e consequências do uso de metodologias de projeto

Benefícios	Requisitos/consequências
<ul style="list-style-type: none"> - Maior organização do trabalho, evitando-se a ocorrência de erros. - Menor necessidade de revisão de projeto, já que etapas são iniciadas a partir da conclusão e revisão de etapas anteriores. - Menor tempo de planejamento das atividades a serem executadas. - Maior repetitividade nas tarefas a serem desenvolvidas, devido ao aprendizado e a padronização de tarefas a serem executadas, possibilitando a automatização de processos. - Possibilita a formação de um banco/portfólio de informações com a experiência acumulada, para a execução de projetos futuros. - Maior favorecimento ao trabalho em equipe. 	<ul style="list-style-type: none"> - A complexidade e a quantidade de atividades da estrutura podem levar a um tempo maior na execução do projeto. - Requer (ou gera) a necessidade organizacional para o registro das informações. - Requer pessoas capacitadas para que os passos da metodologia sejam executados corretamente e para que a experiência da equipe não seja suprimida. - A abordagem estruturada requer grande colaboração de clientes externos e internos. - Requer trabalho em equipe com mecanismo de comunicação. - Requer o domínio de métodos de técnicas de projeto por parte dos membros da equipe.

A melhor forma de superar os requisitos/consequências impostos para se alcançar o sucesso no desenvolvimento de produto é utilizar um método

consolidado para o planejamento e execução do processo de projeto

2.2 MODELO PRODIP E SUAS ETAPAS

As observações desenvolvidas remetem a destacar a importância de metodologias para a integração dos atributos do produto, com o fim de obter produtos robustos, ou seja, com menor probabilidade de falha, funcionalidade adequada, custo compatível, ergonomia, segurança, entre outros.

Existe uma variedade de referências em metodologia de projeto, entre as quais podem-se citar: Asimov (1962), Pahl & Beitz (1977), Blanchard & Fabrycky (1981), Back (1983), Ullman (1992). Entretanto, em função do objetivo desta dissertação, apresenta-se, resumidamente, a metodologia de desenvolvimento de produtos PRODIP. Neste trabalho assume-se a metodologia PRODIP (BACK et al., 2008), pois esta se mostra adequada aos propósitos desta dissertação, além de ser atual e integradora de diferentes propostas de metodologias de projeto de produtos existentes.

A metodologia chamada de Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (PRODIP) é um modelo de referência desenvolvido com base em pesquisas dentro do Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NeDIP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) que contribui para formalizar o processo de desenvolvimento de produtos levando em consideração todo o ciclo de vida.

O modelo de referência contribui para que as empresas passem a executar um processo de desenvolvimento de produtos mais formal e sistemático, integrado aos demais processos empresariais, com os participantes da cadeia de fornecimento e com os clientes finais (BACK et al., 2008, p. 68).

Conforme pode ser observado na Figura 2.1, o modelo é composto por três macrofases – planejamento do projeto, elaboração do projeto do produto e a implementação do lote piloto –, de forma a organizar o processo de projeto considerando as entradas e saídas de tais macrofases.

O modelo PRODIP decompõe o processo de projeto do produto em quatro fases: projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. Da mesma forma que as macrofases, as fases que compõem a elaboração do projeto do produto interagem por meio das entradas e saídas de cada uma, ou seja, as tarefas executadas no projeto informacional, por exemplo, alimentam as tarefas a serem executadas no projeto conceitual e assim por diante. Em cada fase, todos os atributos importantes para o produto em desenvolvimento devem ser considerados.

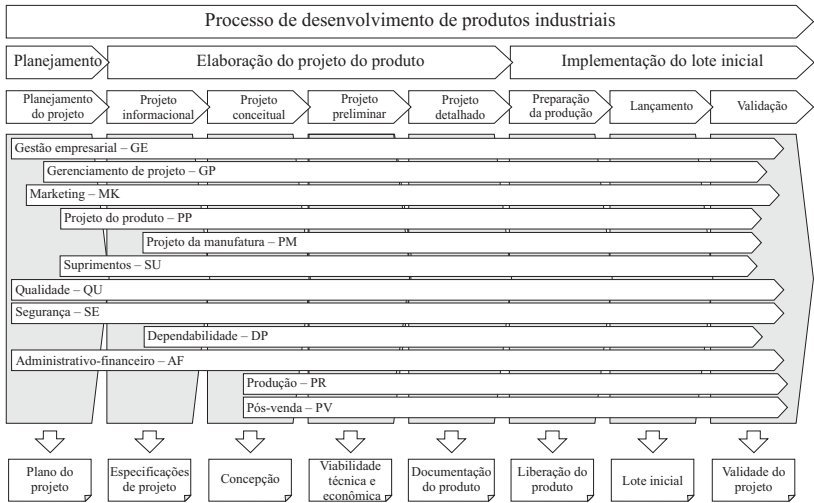


Figura 2.1 – Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos – PRODIP
Fonte: Back et al. (2008, p. 70)

2.2.1 Projeto informacional

Naturalmente, o primeiro passo para se iniciar a fase de projeto de um produto consiste em saber o que se deseja projetar. Assim, o projeto informacional tem o objetivo de definir quais as especificações de projeto do produto (BACK et al., 2008, p. 75).

É possível classificar os projetos em quatro tipos e, dependendo do caso, o levantamento das especificações de projeto se dá de forma distinta. O projeto de inovação consiste em um produto com alto grau de originalidade, que satisfaz necessidades não atendidas por produtos existentes e que, por essa razão, não dispõe de muitas fontes de informação para o levantamento das especificações; o projeto de evolução, por sua vez, pode contar com a experiência acumulada na organização, pois trata-se de um reprojeto de um produto existente; projeto de variação consiste em introduzir algumas mudanças em um produto existente e, assim como o caso anterior, conta com a experiência acumulada; o projeto reverso, por fim, consiste em utilizar a engenharia reversa para produzir um produto de outro fabricante já existente no mercado, contando com as características deste para levantar as especificações.

Desta forma, o projeto informacional tem como entrada o planeja-

mento do projeto – etapa anterior do modelo de referência –, que considera fatores como estratégias de negócios da empresa e organização do trabalho para definir aspectos relevantes para o projeto, tais como: planejamento de marketing, clientes, participantes dentro da organização, gerenciamento da comunicação, definição de escopo entre outros.

A partir de tais entradas, são levantadas as necessidades dos clientes, que então são desdobradas em requisitos dos usuários e traduzidos em requisitos de projeto. Os requisitos de projeto “traduzem” as necessidades dos usuários em uma linguagem de engenharia, considerando atributos como ergonomia, segurança, usabilidade, modularidade, estética, confiabilidade entre outros. Assim, com estes requisitos devidamente listados e priorizados, têm-se as especificações de projeto que descrevem de forma clara o que o produto a ser projetado deve conter. Vale ressaltar que, para alcançar as saídas da etapa, existe uma série de técnicas que podem ser utilizadas, tais como: entrevistas estruturadas com os futuros usuários, sessões de *brainstorming*, pesquisa em material publicado, análise de mercado (*benchmarking*) e o desdobramento da função qualidade (QFD).

Yang (2007) classifica as necessidades dos usuários em três tipos:

- **Necessidades básicas:** descrevem as necessidades fundamentais dos usuários para a funcionalidade do produto.
- **Necessidades de desempenho:** são as expectativas “declaradas” dos usuários, as quais podem levá-los a pagar mais para que tais expectativas sejam atendidas.
- **Necessidades de entusiasmo:** são necessidades em potencial que, caso sejam satisfeitas, podem surpreender e encantar os usuários.

No que se refere à confiabilidade, na fase de projeto informacional são definidas as informações relevantes do ciclo de vida do produto para o desenvolvimento de um bom projeto para confiabilidade, como por exemplo, quais os fatores que caracterizam um bom desempenho para o produto, levantamento das taxas de falha de produtos semelhantes, quais as condições de operação às quais o produto estará sujeito – carregamentos, tensões, fatores ambientais, etc –, quais os índices de confiabilidade a serem alcançados e os riscos envolvidos com a não-confiabilidade. Estas informações podem ser obtidas, por exemplo, com base em referências de mercado, normas técnicas, leis, metas para o ciclo de vida, referenciais de confiabilidade e tempo de garantia.

Os requisitos de projeto para a confiabilidade do produto essencialmente devem definir os critérios de falha do produto. Segundo Yang (2007,

p. 33), “planejar a confiabilidade simultaneamente às características, funcionalidades, custos e outros fatores assegura que as expectativas dos consumidores para a confiabilidade sejam consideradas desde o início”. Por outro lado, por se tratar de uma fase de projeto inicial, não há atividades que contribuem para a confiabilidade de forma concreta.

2.2.2 Projeto conceitual

O projeto conceitual tem como objetivo o desenvolvimento de uma concepção do produto, tendo como entrada as especificações estabelecidas na fase anterior e, como saída, uma concepção selecionada e aprovada do produto que servirá de entrada na fase de projeto preliminar.

De acordo com Back et al. (2008) a primeira tarefa da fase de projeto conceitual é estabelecer a estrutura funcional do produto – que consiste em definir a função global e subfunções –. Yang (2007) também considera o ponto de partida para desenvolver o conceito de um produto a definição da estrutura funcional – os requisitos para tais funções são resultantes das especificações de projeto –, que determina o fluxo de energia e informações, e as interações físicas do produto.

Com a estrutura funcional definida, a equipe de projeto desenvolve alternativas para a concepção do produto que cumprem as funções identificadas e seleciona a mais adequada. A seleção é feita por meio de uma análise comparativa entre as concepções, considerando-se fatores como as especificações de projeto, os custos envolvidos, os riscos de desenvolvimento, e as metas de qualidade, segurança e dependabilidade (BACK et al., 2008).

Para se obter as concepções do produto existem diversas técnicas que podem auxiliar a equipe de projeto. Back et al. (2008) classifica tais métodos em intuitivos e sistemáticos. Entre as técnicas intuitivas estão: *brainstorming*, que é uma técnica utilizada para estimular a criatividade dos indivíduos envolvidos com a definição de concepções para o produto; método de *Delphi*, que consiste em uma forma de coletar opiniões de especialistas por meio de questionários estruturados; analogias diretas, simbólicas e pessoal, que consiste em procurar semelhanças ao analisar o produto ou suas funções com outros campos de conhecimento; e o método sintético, que consiste em buscar a resolução de problemas com base no pensamento criativo. Já entre os métodos sistemáticos, podem ser citados: métodos da matriz morfológica, que consiste em pesquisar diferentes combinações de elementos para encontrar diferentes formas de solucionar um problema; análise de valor, que considera o custo para avaliar o problema; e a TRIZ que é a teoria de solução inventiva de problemas.

A concepção final deverá contemplar os sistemas técnicos e as soluções associadas que respondam positivamente ao atributo de confiabilidade, segundo as especificações do projeto informacional. De acordo com Santos (2001) as especificações de projeto relativas à confiabilidade conduzem a princípios de solução que beneficiam o ciclo de vida operacional do produto – otimização das taxas de falha e tempos médios entre falhas, robustez do produto em relação às condições operacionais –. Portanto, projeto conceitual é um estágio de grande importância considerando sua grande influência sobre a confiabilidade, robustez, custos e outros atributos competitivos do produto (YANG, 2007), pois nesta fase as concepções físicas do produto começam a definir como as funções de subsistemas e componentes serão cumpridas.

2.2.3 Projeto preliminar

No modelo de referência, o projeto preliminar visa estabelecer um leiaute final para o produto, além de um plano de fabricação e de testes para o protótipo. Com isso, busca-se determinar a viabilidade técnica e econômica do leiaute final estabelecido, contando como entrada a concepção selecionada para o produto durante a fase de projeto conceitual (BACK et al., 2008). O plano de fabricação do protótipo deve avaliar os requisitos e a capacidade de manufatura interna e externa e os testes visam a avaliação de aspectos de segurança do produto.

O leiaute deve considerar, além das especificações de projeto – como forma (dimensões), material, segurança, ergonomia, manufatura, entre outros –, as patentes existentes, os aspectos legais, a necessidade de diferentes modelos para o produto, a realização de testes com *mock up*, a viabilidade técnica entre outros fatores. A partir de um leiaute preliminar, pode-se definir as especificações para a fabricação de um protótipo e realizar testes para a otimização da concepção do produto.

Na fase de projeto preliminar, as variáveis com influência direta sobre a confiabilidade começam a ser determinadas, permitindo à equipe de projeto tomar ações que levam ao aumento da confiabilidade do produto. Segundo Santos (2001) as fases em que tais variáveis são escolhidas e que são realizadas predições, ensaios e simulações, são as fases mais aptas a permitir ações de projeto que resultem na melhoria da confiabilidade.

Durante esta fase, por exemplo, testes em modelos (icônicos, analógicos, numéricos e computacionais) podem ser aplicados para simular o desempenho do produto – ou ainda pode-se utilizar o projeto de experimentos (*design of experiments* – DoE) para definir como será feita a avaliação do protótipo –, e avaliar como este se comportará para cumprir suas funções (re-

lacionadas a requisitos como montagem, desmontagem, uso, ergonomia etc.), identificar possíveis falhas e, entre outros fins, se o produto atende aos requisitos de confiabilidade. Sob o ponto de vista da confiabilidade, tais testes podem ser realizados, por exemplo, com os seguintes propósitos:

- Comparar e avaliar a confiabilidade de materiais e componentes selecionados para a concepção do produto.
- Determinar alternativas de projeto otimizadas.
- Confirmar a eficácia de modificações no conceito.
- Levantar alguns modos de falha potenciais.

Como no projeto preliminar o conceito final do produto começa a tomar forma, pode-se utilizar técnicas de análise já consolidadas a fim de avaliar a confiabilidade do produto. Nesta fase, é possível dar início à avaliação dos princípios de solução selecionados na fase de projeto conceitual, utilizando técnicas como FMEA, CNEA, FTA, ETA e, dependendo da existência de dados estatísticos, redes bayesianas, para identificar e analisar alguns modos de falha do produto – tais técnicas serão tratadas no Capítulo 4 –. As informações levantadas podem inclusive servir de orientação para os testes do protótipo, identificando os dados de falha necessários para possibilitar a utilização das técnicas que permitem avaliar o sistema quantitativamente.

2.2.4 Projeto detalhado

Por fim, o projeto detalhado conclui a macrofase de elaboração do projeto do produto. Esta fase tem como objetivo a fabricação, teste e aprovação do protótipo; finalização das especificações dos componentes; detalhamento do plano de manufatura; a preparação da solicitação de investimento; definição do plano de manutenção e descarte; e especificações de operação (BACK et al., 2008). A partir do planejamento realizado na fase de projeto preliminar, o protótipo pode ser fabricado e testado, além de servir como um parâmetro inicial para avaliar os custos do produto.

Testar o produto representa uma etapa essencial em qualquer metodologia de projeto. Os testes em protótipo tem como objetivo avaliar como o produto se comportará, uma vez que estiver sujeito às condições reais de operação, possibilitando assim analisar aspectos como funcionalidade, usabilidade, segurança e confiabilidade. Porém, realizar testes de desempenho dentro de condições normais de operação pode se mostrar economicamente

inviável, podendo-se optar por ensaios de vida acelerados, que reduzem o tempo e os custos para avaliar o protótipo. Com os resultados obtidos em tais testes, a equipe de projeto pode avaliar o produto de forma global e, caso seja necessário, revisar o projeto e determinar possíveis melhorias para então aprovar o leiaute final.

Em relação à confiabilidade, os testes em protótipos permitem comparar opções de projeto que podem resultar em um melhor desempenho e avaliar se o leiaute final do produto satisfaz os requisitos de projeto para a confiabilidade. Assim, os testes podem ser realizados com alguns propósitos principais, tais como:

- *avaliar a relação entre a confiabilidade e as condições de operação do produto;*
- *demonstrar que o produto atente a confiabilidade esperada;*
- *obter valores preliminares para avaliar a confiabilidade do produto;*
- *levantar modos de falha do produto e de seus componentes, considerando sua forma final aprovada;*
- *obter estimativas iniciais para as taxas de falha;*
- *definir o período de garantia;*
- *definir o serviço de assistência técnica, etc.*

Com a fabricação do protótipo, pode-se avaliar a capacidade da organização em fabricar o produto em larga escala, além de detalhar a fabricação do mesmo. Problemas encontrados durante a fabricação de componentes ou na montagem do produto, por exemplo, comprometem significativamente a confiabilidade. Assim, em relação à confiabilidade, a fabricação do protótipo tem como objetivos:

- *detalhar os dimensionamentos dos componentes (detalhes de forma, materiais, tolerâncias e ajustes, por exemplo);*
- *definir padrões de qualidade para componentes fabricados e comprados de fornecedores;*
- *identificar pontos críticos e estabelecer um plano de montagem para o produto (posicionamento e fixação de componentes, por exemplo);*

- *demonstrar que a organização conta com um processo de fabricação capaz de satisfazer os objetivos de confiabilidade do produto, entre outros.*

Com os resultados obtidos nos testes do protótipo, nesta etapa pode-se dar início a uma análise mais detalhada da confiabilidade. É possível, por exemplo, obter dados estatísticos para a análise quantitativa da confiabilidade e, desta forma, obter uma medida propriamente dita da confiabilidade. Assim como no projeto preliminar, existe uma série de técnicas consagradas que auxiliam a avaliação da confiabilidade do produto. É possível, por exemplo, identificar modos de falha, causas e efeitos e, desta forma, desenvolver um modelo utilizando as técnicas FMEA e CNEA. Ou então utilizar os dados estatísticos como entrada de modelos utilizando as técnicas FTA ou redes bayesianas.

Por fim, definem-se os últimos detalhes do produto, tais como a implementação de possíveis mudanças no projeto, a especificação do manual de instruções, a especificação do plano de assistência técnica, a solicitação de investimentos necessários e a aprovação do projeto. Com isso, pode-se dar início à macrofase seguinte de implementação do lote inicial.

2.3 CONFIABILIDADE NAS FASES DO CICLO DE VIDA DO PRODUTO

Conforme foi apresentado, no projeto de produtos, todos os atributos relevantes para o sucesso de mercado devem ser considerados desde as primeiras etapas e, por essa razão, é importante contar com metodologias que auxiliam na organização de seu desenvolvimento. O modelo PRODIP trata do desenvolvimento de produtos até a implementação para a produção, não abordando diretamente as macrofases de uso e descarte. Por essa razão, para tratar as demais macrofases do ciclo de vida e com foco específico em confiabilidade, será utilizado o modelo desenvolvido por Calil (2009) para análise de risco, representado de forma simplificada na Figura 2.2 que exclui o reprojeto.



Figura 2.2 – Ciclo de vida do produto

Fonte: Calil (2009)

A Figura 2.2 está contextualizada na Figura 2.1 do modelo PRODIP acrescida das macrofases de uso e descarte. A ênfase dada nestas macrofases a partir da Figura 2.2 visa contemplar aspectos que não são diretamente abordados no modelo PRODIP mas que precisam ser enfatizadas em relação ao atributo da confiabilidade.

A confiabilidade é um dos atributos que exerce uma importância cada vez maior para o sucesso de mercado dos produtos. Sob o ponto de vista do fabricante, o projeto e a fabricação do produto devem ser realizados com o menor tempo e custo possíveis. Por outro lado, uma vez adquirido, o consumidor espera que o produto opere da forma mais confiável possível, sem necessitar de muita manutenção. Segundo Yang (2007), este conflito de interesses tem motivado os fabricantes a integrar programas de confiabilidade ao ciclo de vida do produto.

2.3.1 Fase de planejamento e projeto

Usualmente, na fase de planejamento do produto, uma equipe multidisciplinar é formada para desenvolver um programa de confiabilidade adequado ao produto a ser desenvolvido, estabelecer metas de confiabilidade, além de conceber e avaliar propostas para o produto sob o ponto de vista da confiabilidade (YANG, 2007). Sempre que possível, tarefas que envolvem a análise de confiabilidade devem ser incorporadas em todas as atividades de planejamento. As decisões tomadas nesta fase exercem grande impacto nas demais fases do ciclo de vida, pois influenciam, por exemplo, nos custos de projeto e produção, no tempo de lançamento (*time-to-market*), competitividade etc.

2.3.2 Fase de projeto

Na fase de projeto, a confiabilidade desempenha um papel particularmente importante, pois objetiva-se incorporar confiabilidade ao produto e eliminar potenciais falhas. Por essa razão, a fase de projeto adiciona mais valor ao produto que qualquer outra fase (YANG, 2007).

Para assegurar que a confiabilidade seja abordada de forma correta durante o projeto, é importante contar com metodologias que estruturam as tarefas a serem realizadas. No projeto conceitual do modelo PRODIP, apresentado anteriormente, os requisitos de projeto (identificados na fase informacional) voltados à confiabilidade são incorporados à concepção do produto, por meio de soluções de projeto que possam reduzir a ocorrência de falhas.

Isto se dá, por exemplo, durante a escolha por acionamento mecânico ou elétrico, sistema hidráulico ou pneumático, sistemas lineares ou rotacionais, etc. Assim, nesta fase de projeto, pode-se dar início a obtenção de um modelo confiabilístico.

Na fase de projeto preliminar, por sua vez, o produto final começa a tomar forma, sendo possível aplicar técnicas mais específicas – como FMEA, FTA, CNEA, ensaios acelerados etc –, para avaliar a confiabilidade do produto. Com isso, é possível identificar possíveis problemas e corrigi-los antes que os custos envolvidos em alterações no projeto sejam elevados demais.

É possível, por exemplo, redimensionar a confiabilidade, que consiste em selecionar componentes ou reorganizá-los – colocar componentes em série ou em paralelo, por exemplo –, de forma que a confiabilidade do produto final seja maior. Para tanto, alguns aspectos devem ser considerados (YANG, 2007):

- **Possibilidade de falha:** componentes utilizados anteriormente, cujo histórico demonstra baixa confiabilidade devem ser evitados, já que o esforço para elevar a confiabilidade é consideravelmente grande. Reciprocamente, componentes cujo histórico demonstra alta confiabilidade devem ser priorizados.
- **Complexidade:** quanto maior o número de subsistemas ou componentes do produto, maior a complexidade e, conseqüentemente, menor a confiabilidade.
- **Criticidade:** sistemas ou componentes cujas falhas podem resultar em danos de grandes proporções, como danos graves ao meio ambiente ou risco à saúde dos usuários, devem ser evitados.
- **Custo:** o custo envolvido para melhorar a confiabilidade varia de acordo com o tipo de sistema/componente, sendo recomendado estabelecer metas mais elevadas para a confiabilidade para componentes cujo custo é mais baixo.

Por fim, no projeto detalhado, são definidos as especificações finais dos componentes e o plano de manufatura, além dos demais aspectos já citados anteriormente. Desta forma, os projetistas devem avaliar o produto para que as especificações de projeto estejam alinhadas com a capacidade da empresa em cumprí-las. Assim, é possível assegurar que as metas de confiabilidade definidas em projeto sejam alcançadas.

Note-se que durante o projeto, as demais fases do ciclo de vida devem ser constantemente consideradas. É importante que o projetista considere, por

exemplo, como o usuário deverá utilizar o produto (evitando falhas causadas por uso incorreto) ou então as características construtivas do produto para reduzir a chance de erros na fabricação ou montagem.

2.3.3 Fase de implementação

Nesta fase do ciclo de vida, a confiabilidade está diretamente ligada à qualidade. Juran & Godfrey (1998) afirmam que há um consenso no qual um produto com baixa confiabilidade é um produto de baixa qualidade. Normalmente, falhas prematuras em produtos (que ocorrem no início da fase de uso) são resultantes de problemas ocorridos durante a fabricação e montagem.

Portanto, as técnicas empregadas nesta fase visam principalmente assegurar que as especificações de projeto sejam respeitadas durante a implementação do produto. Pode-se utilizar técnicas como IDEF0 e FMEA de processo, por exemplo, visando identificar possíveis causas de falhas nos produtos, resultantes desta fase do ciclo de vida.

2.3.4 Fase de uso

Na fase de uso, a análise de confiabilidade e a aplicação das técnicas de análise de falha estão mais voltadas à manutenção. Seja durante o projeto ou após sua inserção no mercado, a análise permite identificar os mecanismos de falha de sistemas e componentes, definir formas de monitorar a ocorrência de falhas e definir um plano de manutenção.

Além disso, o plano de garantia dos produtos é diretamente definido de acordo com a confiabilidade. Desta forma, as decisões tomadas durante a fase de projeto visando aumentar a confiabilidade dos produtos permitem oferecer prazos de garantia maiores, o que reduz custos para as empresas e desempenha um papel importante para conquistar os consumidores.

Já produtos cujo ciclo de vida é mais longo, normalmente equipamentos de grande porte – como máquinas em uma linha de produção, turbinas de geração de energia e equipamentos de linha de transmissão de energia, por exemplo –, podem sofrer melhorias de projeto, visando a melhoria da confiabilidade, resultantes da análise desenvolvida durante a fase de uso. É comum, nestes casos, que além de implementadas nos equipamentos já em sua fase de uso, essas melhorias sejam incorporadas em produtos novos.

Por fim, as técnicas de análise de falha podem ainda ser aplicadas visando a análise de risco, quando falhas em sistemas técnicos podem ocasionar um incidente (dano à reputação da organização, interrupção do sistema téc-

nico etc.) ou um acidente (comprometimento à segurança) (CALIL, 2009)

2.3.5 Fase de descarte

Na fase de descarte, as técnicas de análise de falha podem ser aplicadas quando um produto oferece riscos ao meio ambiente ou à pessoa. Pode-se, por exemplo, aplicar uma FMEA de processo para avaliar os procedimentos envolvidos na desmontagem do sistema técnico visando mitigar o contato com substâncias tóxicas ou risco de explosão, por exemplo. Calil (2009) apresenta uma metodologia desenvolvida para a gestão de risco que utiliza algumas das técnicas apresentadas neste trabalho.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do Capítulo 2, foram apresentados alguns conceitos referentes ao desenvolvimento de produto para contextualizar o presente trabalho, tendo em vista que o objetivo geral é apresentar uma estrutura para aplicação de técnicas voltadas ao projeto para confiabilidade.

Com isso, buscou-se demonstrar a importância e os benefícios da utilização de abordagens estruturadas por meio de metodologias de projeto de produtos, essencialmente no que se refere à organização do processo de projeto para que todos os requisitos definidos para o produto sejam alcançados.

Vale ressaltar que, apesar de o conceito de produto definido por Juran (1997) englobar tanto bens físicos quanto serviços, no presente trabalho o termo “produto” tratará apenas de bens físicos, ou seja, sistemas técnicos que podem ser desdobrados em subsistemas e componentes. Com isso, busca-se facilitar o entendimento dos termos utilizados já que há uma certa distinção na forma de tratar bens e serviços. Por outro lado, é importante esclarecer que, apesar de o trabalho referir-se apenas a bens físicos, seu conteúdo também pode ser extrapolado para serviços.

Entre as várias metodologias de projeto existentes, optou-se por seguir o modelo de referência PRODIP, o qual é estruturado em quatro fases: projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. Esta metodologia é voltada para o desenvolvimento de produtos considerando todos os aspectos relevantes para o seu sucesso de mercado. Porém, dado o objetivo geral deste trabalho, a metodologia será tratada sob o ponto de vista do atributo de confiabilidade.

O foco dado à macrofase de projeto se deve à importância que esta exerce sobre as demais macrofases representadas nas Figuras 2.1 e 2.2. As

decisões tomadas durante a macrofase de planejamento influenciam a profundidade com que será abordada a macrofase de projeto, uma vez que durante o planejamento são definidos aspectos como tempo, recursos e especialistas envolvidos na aplicação das técnicas para obter as informações requeridas pelo atributo de confiabilidade. Da mesma forma, a macrofase de projeto influencia as macrofases seguintes, uma vez que as decisões de projeto definirão como o produto cumprirá os requisitos definidos para as demais macrofases no que se refere à confiabilidade. Portanto, apesar da possibilidade de se distinguir as macrofases, elas possuem uma relação estreita, sendo necessário, sempre que possível, considerá-las em conjunto.

Note-se que na macrofase de projeto, apesar da grande relevância para a confiabilidade do produto, nas duas primeiras fases o projeto para confiabilidade está mais limitado à definição de requisitos e metas de confiabilidade, além da seleção de princípios de solução para o conceito final do produto que influenciam a confiabilidade. Porém, com base no modelo funcional e dependendo da disponibilidade de informações, em alguns casos é possível dar início à construção de um modelo confiabilístico.

Desta forma, considerando-se o foco na macrofase de projeto, os conceitos apresentados nos demais capítulos estarão focados nas fases de projeto preliminar e detalhado, tendo em vista que em tais fases o tratamento da confiabilidade se dá de forma mais concreta, uma vez que já existe um conceito físico definido para o produto, podendo-se dar início à análise de seu funcionamento, da relação entre as condições de operação dos diferentes subsistemas e componentes, da confiabilidade dos componentes e demais informações relevantes para se desenvolver um projeto para a confiabilidade. Além disso, nos demais capítulos serão apresentados alguns conceitos referentes à análise de confiabilidade e algumas das técnicas que serão empregadas no presente trabalho, voltadas para dar suporte à análise dentro do processo de desenvolvimento de produtos.

3 ABORDAGEM SOBRE CONFIABILIDADE

Segundo Brombacher et al. (2004), no desenvolvimento de produtos as empresas vêm lutando para alcançar o equilíbrio entre, de um lado, o desempenho funcional e o grau de inovação e, por outro lado, a qualidade e a confiabilidade dos produtos.

Para alcançar um alto grau de satisfação dos consumidores, a confiabilidade deve ser tratada durante toda a fase de desenvolvimento do produto, preferencialmente com a integração de todos os departamentos dentro da cadeia de desenvolvimento, já que a ocorrência de falhas pode estar relacionada com todos os estágios de desenvolvimento (BERTSCHE, 2008, p.3). De fato, segundo Billinton & Allan (1992, p. 13), “um produto ou sistema possui uma confiabilidade inerente, criada durante o projeto”. Juran & Godfrey (1998) afirma ainda que a melhoria da confiabilidade é uma parte importante quando o objetivo maior é aumentar a qualidade de produtos.

Atividades voltadas para a análise de confiabilidade exercem um papel muito importante durante a fase de projeto de produtos, pois é nesta fase do ciclo de vida que tais atividades contribuem de maneira mais significativa para o valor dos produtos, já que adiciona-se confiabilidade e eliminam-se potenciais modos de falha (YANG, 2007). A utilização de metodologias, métodos e técnicas voltadas para a análise de confiabilidade contribui de forma significativa para acelerar o processo de projeto, dado que visam obter projetos que satisfaçam os objetivos de confiabilidade nas primeiras tentativas, ou seja, sem a necessidade de reprojeção – contribuindo desta forma para a redução de seus custos.

O conceito de projeto para confiabilidade (*design for reliability* – DFR) é amplamente utilizado para que, durante o projeto do produto, seja possível alcançar, de forma mais rápida e satisfatória, os requisitos relacionados à confiabilidade. Assim como outras diretrizes existentes sob o rótulo DFX (*design for x*) – como Projeto para Manufatura, Projeto para Meio Ambiente, Projeto para Montagem entre outras –, o projeto para confiabilidade consiste no processo de desenvolver o projeto com o objetivo de otimizar, de forma integrada, o produto para a mínima ocorrência de falha durante o ciclo de vida. Em outras palavras, o atributo da confiabilidade tem por meta a integridade da função ao longo do ciclo de vida.

Vale ressaltar que, conforme pode ser observado na Figura 3.1, quanto mais cedo a análise de confiabilidade for aplicada, menor o custo sobre o produto (BERTSCHE, 2008) – deve-se priorizar ações preventivas nas fases iniciais do ciclo de vida, especificamente no projeto –, o que torna importante a adoção dos conceitos de projeto para confiabilidade para seu sucesso. Além

disso, a falta de confiabilidade em produtos leva ao aumento dos custos, pois a ocorrência de falhas resulta na necessidade de aumento da garantia e na redução das vendas – e conseqüentemente dos lucros da organização–, devido ao impacto negativo que as falhas exercem sobre a satisfação dos consumidores (MURTHY et al., 2009).

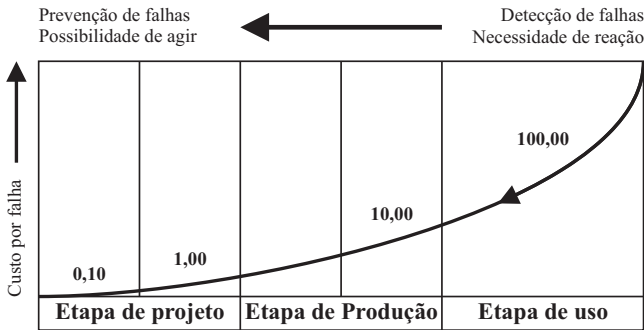


Figura 3.1 – Relação entre os custos da ocorrência de falhas e a fase do ciclo de vida

Fonte: Bertsche (2008, p. 4, tradução do autor)

A maneira de tratar a confiabilidade no projeto de um produto está diretamente relacionado com aspectos de seu ciclo de vida, tais como o nível tecnológico e o mercado em que será inserido. Brombacher et al. (2004), por exemplo, classifica a forma de análise da confiabilidade de acordo com a inserção do produto em três categorias de negócios:

- produtos com ciclo de vida econômico mais curto que sua vida útil, como um microcomputador ou um celular;
- a vida útil do produto é equivalente a sua vida econômica, como um carro; e
- a vida útil do produto é mais longa que sua vida econômica, tal como uma turbina em uma usina hidrelétrica.

Assim, dependendo da característica do ciclo de vida, a confiabilidade deve ser abordada de maneira distinta. No primeiro caso, por exemplo, seria mais interessante focar a análise da confiabilidade na etapa de projeção do ciclo de vida, já que o produto tende a entrar em obsolescência antes de começar a apresentar falhas. Já para um produto com a vida útil equivalente à

vida econômica, a análise deve considerar a manutenção do produto dentro da macrofase de uso, buscando aumentar o tempo médio entre falhas (MTBF) ou reduzir o tempo médio até o reparo (MTTR), por exemplo. No último caso, durante a macrofase de uso do produto, pode-se aplicar a análise de confiabilidade para identificar e implementar possíveis melhorias de projeto.

Por outro lado, Santos (2001) classifica a análise de confiabilidade de acordo com o mercado e de acordo com o produto, conforme apresentado resumidamente na Figura 3.2. No primeiro caso, o autor classifica o mercado em três tipos:

- **Mercado consumidor:** neste caso, o cliente direto é a população e a confiabilidade é equivalente à qualidade e, neste caso, as falhas ocorridas em campo representam prejuízo à imagem da empresa e na aceitação do produto. Segundo Juran (1997), a prioridade máxima no desenvolvimento de um produto são as características que o tornam vendável, e a segunda prioridade é evitar falhas durante o uso.
- **Mercado industrial:** as empresas são fornecedoras de produtos para outras empresa, cuja característica é a existência de uma série de normas e padrões que classificam um produto como confiável ou não. As empresas de serviços e os processos industriais dependem da continuidade na operação de seus equipamentos, tornando o índice de falhas durante a operação de tais equipamentos em um elemento importante de concorrência (JURAN, 1997).
- **Mercado militar ou aeroespacial:** já neste último caso, os clientes são poucos e os padrões são muito restritivos e a confiabilidade é definida por normas. Neste mercado, a ocorrência de falhas tem sérias consequências para a empresa (para a imagem e responsabilidades legais) e a possibilidade de melhorias de confiabilidade depende da relação da empresa com o cliente.

Sob o ponto de vista do produto, o autor classifica as atividades para assegurar a confiabilidade em três tipos:

- Métodos para medir e prever falhas, que visam estimar falhas ao longo do tempo e dependem da existência de dados estatísticos.
- Métodos para admitir a falha, cujo princípio é conhecer as falhas para então tomar medidas para que suas consequências sejam controladas, por exemplo, pela aplicação de redundâncias (consequências para o produto) ou aumentar o período de garantia (consequência para a empresa).

- Métodos para prevenir as falhas, que visam identificar as falhas que ocorrerão no produto para possibilitar modificações no projeto, fazendo com que as falhas deixem de ocorrer.

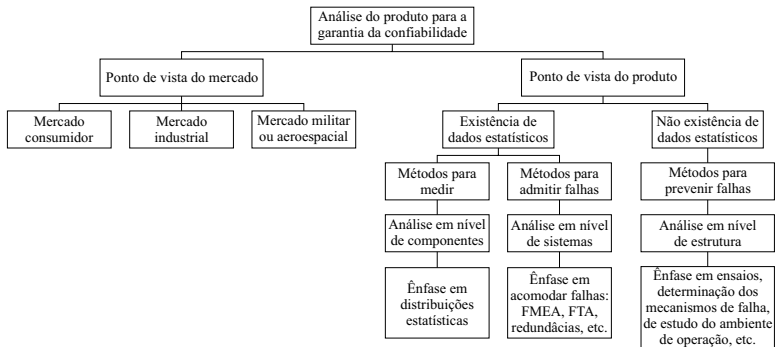


Figura 3.2 – Confiabilidade de acordo com o mercado e o produto

Fonte: Santos (2001)

3.1 DEFINIÇÃO DE CONFIABILIDADE

A norma NBR 5462 (ABNT, 1994) traz a seguinte definição de confiabilidade: a “capacidade [ou habilidade] de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo”. Já o Departamento de Defesa dos Estados Unidos define confiabilidade de duas formas (USA/DOD, 1981): como a duração ou probabilidade de desempenho sem a ocorrência de falhas sob condições definidas; ou a probabilidade de um item desempenhar as funções esperadas durante um intervalo de tempo especificado sob condições definidas.

Segundo Billinton & Allan (1992, p. 6), uma definição bastante utilizada estabelece a confiabilidade como “a probabilidade de um sistema desempenhar seu propósito adequadamente por um período desejado, dentro das condições de operação encontradas”. Segundo os autores, essa definição separa a confiabilidade em quatro partes:

- Probabilidade: a probabilidade fornece uma entrada numérica para a avaliação da confiabilidade e representa a chance de um dado evento ocorrer. A consideração da probabilidade nas fases de projeto é um

tanto complexa, tendo em vista que a disponibilidade de dados estatísticos é limitada.

- Desempenho adequado: o projeto consiste em conceber um produto com a finalidade de cumprir certas funções demandadas por aqueles que utilizarão o produto dentro de padrões estabelecidos, tornando seu desempenho no cumprimento de tais funções um critério importante para avaliar a confiabilidade do produto. O padrão de desempenho pode ser levantado por meio de pesquisas de *marketing*, consulta de normas técnicas, leis ambientais, históricos de falha etc.
- Tempo (ciclo de vida): todo produto falha mais cedo ou mais tarde em seu ciclo de vida. A ocorrência inesperada de uma falha durante a operação de um produto pode levar a uma variedade de consequências para o usuário, desde interrupção da operação até riscos à sua saúde. Desta forma, o tempo que o produto é capaz de operar sem a ocorrência de falhas torna-se um critério importante na avaliação da confiabilidade.
- Condições de operação: as taxas de falha de componentes estão diretamente relacionadas com as condições de operação. Quanto mais severas são as condições (temperaturas extremas ou esforço mecânico elevado, por exemplo) maior a chance de ocorrer falhas. Além disso, quando se define o desempenho esperado para o produto, deve-se estabelecer sob quais condições o produto irá operar.

Pode-se perceber que, apesar da existência de diversas definições para a confiabilidade, todas elas convergem para a mesma estrutura citada por Billinton & Allan (1992) e, com isso, é necessário caracterizar o ciclo de vida do produto e estabelecer índices para mensurar sua confiabilidade. Para tanto, o projetista pode contar com uma série de informações, conhecimento, técnicas e métodos para analisar o produto quantitativa e qualitativamente.

É frequente na literatura abordagens que focam a análise de confiabilidade do ponto de vista qualitativo, quando há dificuldade em se obter dados estatísticos para análise ou quando se desenvolve novos projetos. Nos casos em que se dispõem de dados, a análise requer referências estatísticas para processar as informações e fornecer os valores de probabilidade.

Segundo Billinton & Allan (1992, p. 6) a análise de confiabilidade “requer o entendimento detalhado do sistema, de seu projeto, de como opera, de como falha, do ambiente em que este está inserido e dos esforços que o sistema está sujeito”. Assim, a análise qualitativa da confiabilidade é importante devido ao papel que desempenha na modelagem do sistema em análise, ou seja, na caracterização do sistema – identificação dos subsistemas, componentes e suas funções, relação causa-efeito, etc –.

Mesmo que dados estatísticos estejam disponíveis ao projetista, este não é capaz de analisar de forma correta um dado sistema sem o seu entendimento detalhado, como já identificado na descrição da Figura 3.2. Assim, a análise qualitativa da confiabilidade permite analisar o sistema para, entre outros fins, identificar seus subsistemas e componentes, e com isso identificar para quais deles existem dados estatísticos disponíveis, quais devem ser analisados com mais detalhes, quais os tipos de distribuições que se aplicam a cada um, etc. Na fase de projeto este tipo de análise pode ser iniciado a partir da fase de projeto conceitual.

Por outro lado, caso os dados estatísticos não estejam disponíveis, não é possível realizar uma análise quantitativa de forma imediata – pode-se coletar dados ao longo do tempo, tanto na macrofase de projeto quanto na de uso, para então alimentar este tipo de análise –, mas apenas avaliar qualitativamente a confiabilidade. Neste caso, o objetivo é avaliar os sistemas, subsistemas e componentes, identificando-se os mecanismos de falha e então tomar medidas para, por exemplo, prevenir ou admitir as falhas. Juran & Godfrey (1998) estabelecem como primeiros passos do projeto para confiabilidade a definição de metas de confiabilidade (durante a fase de planejamento do projeto), obtenção de modelos de confiabilidade (a partir da fase de projeto conceitual) e avaliar se as metas de confiabilidade dentro do modelo.

No caso da prevenção das falhas, o analista deve utilizar técnicas e métodos que permitem identificar modos de falha, quais as causas de tais modos de falha e quais as consequências destes modos de falha, para então estabelecer formas de evitar que as falhas ocorram ou, caso as consequências não sejam severas, estabelecer medidas de contingência para o caso da falha ocorrer.

Segundo Billinton & Allan (1992, p. 5) a análise quantitativa da confiabilidade pode ser usada com dois propósitos: avaliar o desempenho passado e prever o desempenho futuro. Segundo os autores, a avaliação do desempenho passado possibilita:

- *identificar áreas frágeis que necessitam de reforços ou modificações;*
- *estabelecer tendências cronológicas na confiabilidade;*
- *estabelecer índices existentes que servem como referência para a avaliação futura da confiabilidade;*
- *permite que previsões passadas possam ser comparadas com dados reais; e*
- *possibilita monitorar a resposta sobre modificações de projeto realizadas.*

Prever o desempenho futuro, por sua vez, é importante pois permite:

- *estimar a expectativa de desempenho de um dado sistema;*
- *prever os benefícios de alterações de projeto;*
- *prever os efeitos de políticas de operação e manutenção alternativas;*
e
- *avaliar o custo/benefício do desempenho futuro estimado para o sistema e de alterações de projeto.*

Assim, com o objetivo de avaliar quantitativamente a confiabilidade, há que basear-se em modelos matemáticos que possibilitam estimar a probabilidade. A partir de um histórico de falhas pode-se medir e avaliar a ocorrência das falhas e então decidir pela prevenção ou simplesmente acomodação das falhas. Para isso deve-se selecionar uma distribuição de probabilidade apropriada ao sistema a ser analisado – dependendo da aplicação, da variabilidade dos dados ou mesmo da experiência e da facilidade em interpretar os dados que aquela função pode fornecer –, e representar os dados na forma da função densidade de probabilidade $f(t)$, taxa de falha $\lambda(t)$, função confiabilidade $R(t)$ e da função não-confiabilidade $F(t)$.

A função densidade de probabilidade representa a relação entre a frequência de ocorrência das falhas e o tempo – ou seja, a distribuição das falhas no tempo. Na Figura 3.3 está apresentada uma função densidade de probabilidade hipotética e é possível observar que, com um número suficientemente grande de sistemas (ou componentes) testados até a falha, ou de dados coletados em campo, pode-se estabelecer uma curva que representa o comportamento geral do sistema.

Na ordenada distribuem-se as falhas e na abcissa o tempo em que as falhas ocorreram. Para um ensaio com falhas sem reposição tem-se uma distribuição semelhante à apresentada na Figura 3.3, na qual a curva que representa a $f(t)$ contínua é obtida a partir dos pontos médios dos conjuntos de falhas discretizados no tempo t .

A função não-confiabilidade (também chamada de probabilidade acumulada de falha), por sua vez, é uma função crescente que representa a frequência acumulada das falhas em um dado instante t_s , ou seja, a porcentagem de itens que falharam até o instante t_s . Tal função é obtida a partir da integração da função densidade de probabilidade, ou seja:

$$F(t_x) = \int_0^{t_x} f(t) dt \quad (3.1)$$

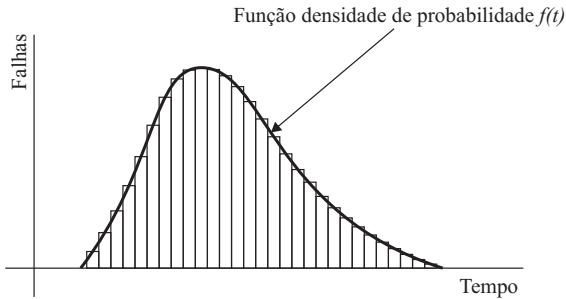


Figura 3.3 – Função densidade de probabilidade
 Fonte: Adaptado de Bertsche (2008, p. 13)

A porcentagem de itens que não falharam até o mesmo instante t_s corresponde à confiabilidade, que pode ser calculada como:

$$R(t_x) = 1 - F(t_x) \quad (3.2)$$

A Figura 3.4 fornece uma representação visual da Equação 3.2 e da relação entre a confiabilidade e a não-confiabilidade de dado sistema, no qual pode-se perceber que, para um dado instante t_s , $R(t_s)$ é complementar à $F(t_s)$.

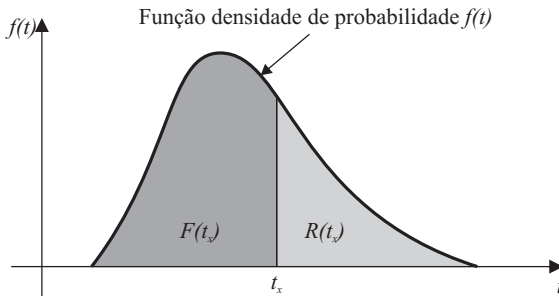


Figura 3.4 – Relação entre a confiabilidade e a não confiabilidade
 Fonte: Fonte: Adaptado de Bertsche (2008, p. 20)

Finalmente, a taxa de falha é dada pelo número de componentes que falharam em um dado intervalo de tempo, em relação ao número total de componentes expostos às falhas, de acordo com a seguinte equação:

$$\lambda = \frac{\text{número de falhas por unidade de tempo}}{\text{número de componentes expostos à falha}} \quad (3.3)$$

A taxa de falha também pode ser relacionada com a função densidade de probabilidade e a confiabilidade, obtendo-se a Equação 3.4.

$$\lambda = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.4)$$

É importante ressaltar que na maioria dos casos o comportamento do sistema ou componente condiz com alguma distribuição de probabilidade conhecida. O tempo até a falha de sistemas e componentes obedecem distribuições de probabilidade, conhecidas ou não, que descrevem a probabilidade destes falharem dado um certo intervalo de tempo (BILLINTON; ALLAN, 1992). A Figura 3.5 apresenta algumas das principais distribuições de probabilidade utilizadas para representar a ocorrência das falhas ao longo do ciclo de vida, bem como para o cálculo da probabilidade: normal, exponencial e weibull.

Além da probabilidade, outros parâmetros também são bastante utilizados para avaliar quantitativamente a confiabilidade:

- *número esperado de falhas ocorridas em um dado período;*
- *tempo médio entre falhas;*
- *duração média do funcionamento de um sistema ou componente;*
- *os custos esperados devido à ocorrência de falhas; e*
- *as perdas ocorridas nos resultados de saída do sistema devido à ocorrência das falhas.*

Para se utilizar as funções de probabilidade a partir da $f(t)$ é preciso ter dados estatísticos das falhas da funções no nível de análise que seja mais conveniente fazer: sistema, subsistema ou componente. Como evidenciado na Figura 3.2, diante da não existência de dados estatísticos, deve-se desenvolver processos que possibilitem sua obtenção.

Para alguns sistemas, subsistemas ou componentes, tais dados são estatisticamente pouco significativos dado que a ocorrência de falha é muito baixa. Em qualquer dos casos, há que se desenvolver processos de levantamento de dados pelo uso de métodos de experimento, acompanhamento de dados de campo, simulações como Monte Carlo, Markov, Bayes, etc.

3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A informação sobre a confiabilidade, representada normalmente por um percentual, é um parâmetro importante para a avaliação e aceitação do

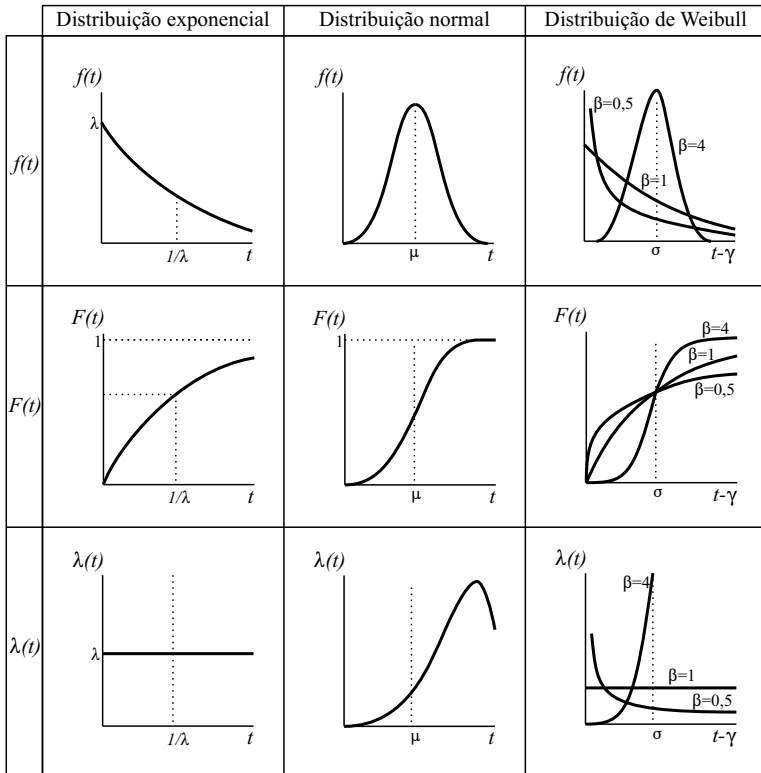


Figura 3.5 – Exemplos de distribuição de probabilidade aplicadas à confiabilidade

Fonte: Adaptado de Kumamoto & Henley (1996, p. 308)

produto no mercado. Contudo, o que mais interessa sob o ponto de vista da engenharia são as informações sobre as falhas – causas e efeitos das falhas, estatística das falhas ocorridas, probabilidade de ocorrência ao longo do ciclo de vida, etc.

Para se ter um controle sobre estas informações passa a ser muito importante dispor de um processo preciso de análise de falhas. Para isso é necessário utilizar técnicas apropriadas para as diferentes abordagens requeridas pelos produtos, tanto no aspecto geral do uso, quanto nos aspectos específicos das falhas nos componentes.

Ao logo do Capítulo 3 foram apresentados alguns conceitos referentes à análise de confiabilidade e análise de falhas. Conforme o que foi apresen-

tado, pode-se perceber a importância da parte qualitativa da análise, assim como a seleção e o uso de técnicas adequadas aos sistemas técnicos analisados e aos resultados esperados, tendo em vista a necessidade de entendimento sobre as falhas do sistema e falta de dados disponíveis.

É importante ressaltar que o foco desta dissertação de mestrado está nas técnicas de análise de falhas que dão suporte à análise da confiabilidade. Desta forma, quando necessário serão utilizados dados de falha obtidos em banco de dados existentes, como o *Offshore Reliability Data* (SINTEF, 2002).

No Capítulo 4 serão apresentadas algumas técnicas comumente utilizadas na análise de falha, assim como uma estrutura para a utilização combinada das mesmas, objetivando-se a obtenção de um modelo mais detalhado do sistema em análise.

4 TÉCNICAS PARA ANÁLISE DE FALHA

O projeto para confiabilidade depende das informações estatísticas que são representadas pelas distribuições e também do que pode (e deve) ser feito para eliminar as causas que levam à ocorrência dos modos de falha, assim como os efeitos indesejados sobre as funções.

Dado a complexidade envolvida na análise de confiabilidade e, por sua vez, na análise de falha, é necessário fazer uso de diferentes técnicas que auxiliam no levantamento de informações, entendimento do funcionamento do sistema em análise, gestão do conhecimento, modelagem do sistema etc.

Para dar início ao processo de análise de confiabilidade, por exemplo, é necessário conhecer quais as funções esperadas do sistema em análise que permitem avaliar seu desempenho. A partir de então, pode-se analisar como essas funções podem deixar de ser cumpridas, quais os efeitos do não cumprimento das funções etc.

Assim, de acordo com os objetivos da análise pode-se utilizar: técnicas para análise funcional, que permitem identificar em detalhes o objeto de estudo; e as técnicas para análise de falha, que possibilitam identificar como os sistemas podem deixar de cumprir as funções definidas.

4.1 TÉCNICAS PARA ANÁLISE DAS FUNÇÕES

A análise funcional é fundamental para o início do processo de análise de falha. A falha, em grande parte, é evidenciada por algum problema identificado no cumprimento das funções do sistema. Assim, uma vez bem definida a função, quer seja no sistema técnico, quer seja em um processo, torna-se mais fácil caracterizar a falha. No primeiro caso, destaca-se a análise funcional de produto e no segundo caso, tem-se, por exemplo, a técnica IDEF0.

Note-se que, dependendo do escopo de análise, pode ser necessário aplicar as duas técnicas. Se o escopo de análise envolver operação e manutenção, por exemplo, deve-se aplicar a análise funcional de produto para o levantamento de falhas relativas ao sistema técnico, além da análise dos processos envolvidos com a operação e manutenção – por meio da técnica IDEF0 –, permitindo identificar falhas como procedimentos de operação e manutenção incorretos, pontos suscetíveis à falhas humanas, falhas relacionadas ao fornecimento de peças etc.

4.1.1 Análise funcional de produto

A análise funcional de produto é uma técnica que permite identificar as funções e subfunções de um sistema técnico – relativas ao sistema, subsistemas e componentes –, relacionando-as por meio do fluxo de energia, material e sinal, conforme apresentado na Figura 4.1.

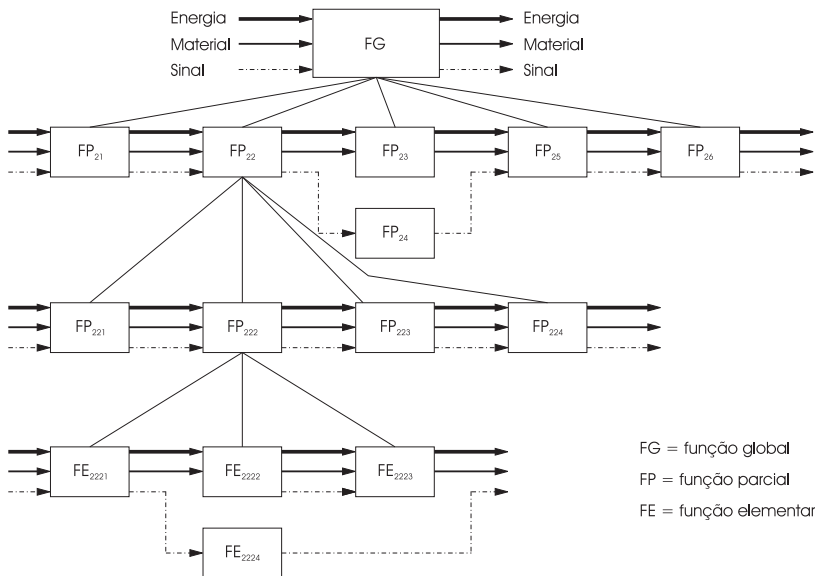


Figura 4.1 – Desdobramento de funções na análise funcional de produtos

Fonte: Back et al. (2008, p. 303)

Para o desenvolvimento da análise funcional de produto, o primeiro passo é a descrição detalhada do sistema técnico, que é essencial para orientar o desdobramento do sistema em subsistemas e componentes, assim como a identificação da função global e subfunções (chamadas de parciais para subsistemas e elementares para componentes).

Esta técnica oferece liberdade ao analista para desdobrar o sistema técnico em subsistemas e componentes de acordo com o nível de detalhamento desejado, dependendo dos objetivos da análise. Uma vez desdobrado, as subfunções necessárias para o cumprimento da função global podem ser identificadas e outras técnicas podem ser utilizadas para dar continuidade à análise de falhas.

Segundo Dias et al. (2011), a representação gráfica utilizada pela técnica de análise funcional auxilia na compreensão do sistema, uma vez que permite identificar quais as subfunções necessárias para o cumprimento da função global do sistema, assim como os subsistemas e componentes responsáveis por tais subsunções. Os autores ressaltam ainda que a utilização da técnica é uma atividade iterativa, uma vez que, conforme o entendimento sobre o sistema aumenta, o modelo desenvolvido pode sofrer constantes atualizações.

Com a aplicação desta técnica obtém-se as funções discretizadas em um nível de detalhe tal que é possível compor, por exemplo, diagramas de blocos funcionais (que podem ser transformados nos chamados modelos de confiabilidade). Neste caso, ainda é possível calcular a confiabilidade (caso exista dados de falha) em relação ao cumprimento da função de transformação de material.

4.1.2 IDEF0

A técnica IDEF0 é utilizada para desenvolver um modelo funcional de processos dentro de uma organização ou sistema (NIST, 1993). A ideia por trás da técnica IDEF0 é representar graficamente as relações entre os processos ou funções envolvidos nas atividades da organização por meio de suas entradas, saídas, mecanismos e controles. A representação das informações de maneira organizada e sistemática possibilita o ganho de conhecimento, oferece suporte à análise, ajuda a especificar requisitos para o cumprimento de tais funções e ainda oferece suporte a atividades relacionadas ao projeto ou integração de atividades. Seu desenvolvimento se deu a partir de um programa para auxiliar a manufatura chamado ICAM (*Integrated Computer Aided Manufacturing*), com base em uma linguagem consolidada (SADT – *Structured Analysis and Design Technique*) com o objetivo de contribuir para a modernização tecnológica e aumentar a produtividade na indústria aeronáutica estadunidense, pelo emprego sistemático de tecnologias computacionais, durante os anos de 1970 (PRESLEY, 1997).

A IDEF0 faz parte da família de técnicas IDEF (*Integrated Definition for Function Modeling*) que, por sua vez, foram desenvolvidas para aumentar o nível de desempenho de uma organização por meio da integração de informações, permitindo orientar ações de melhoria baseadas em argumentos racionais focados nas decisões mais importantes a serem tomadas – o que reduz a complexidade do processo de decisão. Existe uma série de técnicas IDEFs além da IDEF0 como, por exemplo, a IDEF1 para modelagem de informações, a IDEF2 para modelagem da dinâmica dos sistemas, a IDEF5 para

a descrição de ontologias, entre outras.

Nos modelos desenvolvidos com a técnica IDEF0, a partir de uma atividade de nível superior, é possível decompor um processo em atividades de nível inferior, como apresentado na Figura 4.2, mas conforme a decomposição se desenvolve, tornam-se mais complexos o controle e organização das atividades.

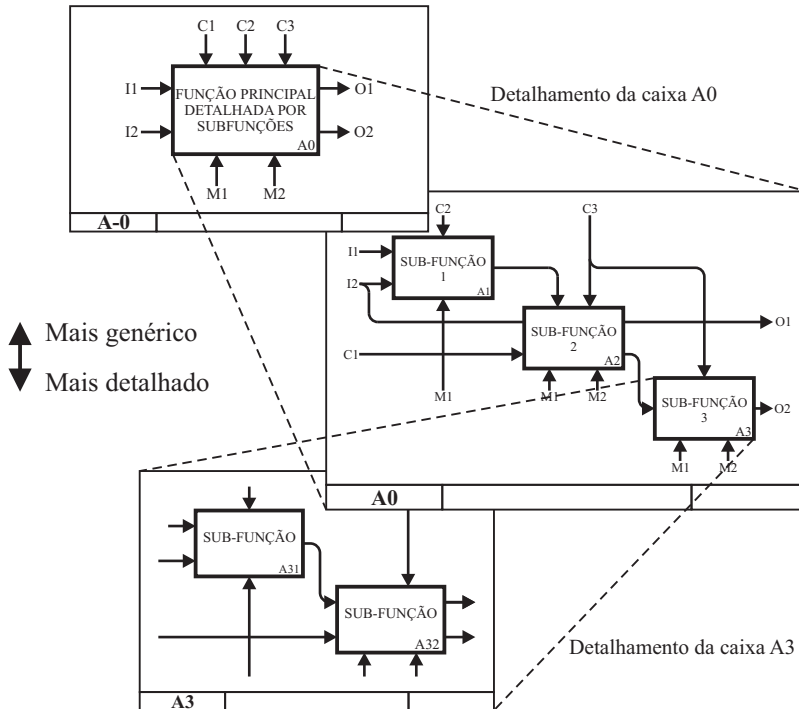


Figura 4.2 – Desdobramento das atividades no modelo IDEF0

Fonte: Adaptado de NIST (1993, p. 16, tradução nossa)

À primeira vista, o processo de criação de um modelo IDEF0 pode parecer um tanto complexo, porém, conforme há uma maior familiarização com os princípios por trás da técnica, tal processo torna-se consideravelmente mais simples. Quatro elementos básicos compõem a sintaxe da técnica IDEF0 (NIST, 1993), a saber:

- **Caixas:** caixas retangulares de linhas contínuas são utilizadas para representar uma função a ser modelada, contendo o nome da função que

ela representa e um rótulo (*tag*) que identifica a função (Figura 4.3). A função principal é identificada pela “*tag*” A0 e suas subfunções por A1, A2, A3 e assim por diante.

- **Setas:** nos modelos IDEF0 são utilizadas setas, representadas na Figura 4.3, para representar dados ou objetos relacionados às funções, e não fluxo ou sucessão como em fluxogramas de processo tradicionais.
- **Regras:** as regras definem como os componentes devem ser utilizados. Em relação às setas, as regras estabelecem, por exemplo, que estas devem ser compostas por um ou mais segmentos de linhas contínuas, ter uma ponta de flecha na extremidade terminal, ser apenas verticais ou horizontais (nunca diagonais), entre outras.
- **Diagramas:** os diagramas oferecem uma forma de representar os modelos, gráfica e verbalmente, favorecendo seu entendimento correto. Todo modelo deve ter um diagrama de contexto A-0 (primeiro diagrama da Figura 4.2) que representa o escopo de análise por uma única caixa e suas setas – estas setas representam a interface do sistema com o meio em que esta inserido –.

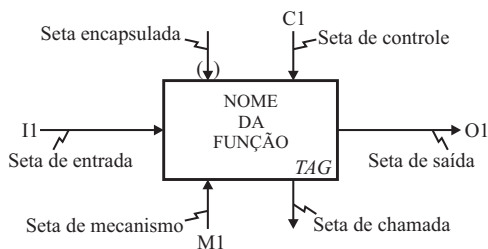


Figura 4.3 – Tipos de setas dos diagramas IDEF0

Uma grande vantagem da técnica está na existência de regras claras para o desenvolvimento dos modelos. Isto permite o claro entendimento das atividades envolvidas no processo de modelagem, assim como a interpretação das informações pelas pessoas envolvidas com as atividades da organização. A existência de tais regras possibilita ainda o desenvolvimento de ferramentas computacionais para dar suporte ao processo de modelagem. Além disso, a estrutura hierárquica empregada pela técnica simplifica o mapeamento de processos e atividades dentro da organização até um nível de detalhamento

maior e, devido à forma de representar graficamente o modelo, a técnica favorece o processo de análise e atualização constante do modelo – sendo possível, por exemplo, analisar no sentido contrário, das saídas para as entradas, o que pode levar à identificação de novos controles e mecanismos relevantes para o modelo.

Por outro lado, a forma hierárquica da representação pode levar à interpretação dos modelos IDEF0 como uma sequência de atividades. Isso ocorre devido à organização das funções dentro dos diagramas, da esquerda para a direita, e a forma de ligação entre tais funções – conectadas por setas que, conforme citado anteriormente, podem ser erroneamente interpretadas como linhas de fluxo ou sucessão.

Presley (1997) chama atenção ainda para críticas quanto a notação informal da técnica IDEF0, apesar de bastante estruturada, pois a falta de definições matemáticas na técnica pode tornar difícil identificar, ordenar e medir os problemas envolvidos com o processo em análise. O autor aponta ainda a existência de críticas quanto à subjetividade dos modelos que pode tornar difícil justificar mudanças significativas nas operações de uma organização. Por outro lado, como o objetivo do uso da técnica é mapear processos, ela serve como uma excelente ferramenta de planejamento e capacitação dentro de uma organização.

4.2 TÉCNICAS PARA ANÁLISE DAS FALHAS

A análise de falha em sistemas técnicos tem como objetivo o entendimento sobre toda a cadeia que envolve a ocorrência de um dado modo de falha. Para tanto, faz-se uso de diferentes técnicas que permitem identificar e representar em detalhes tanto as causas que levam à ocorrência do modo de falha, como os seus efeitos. A partir das informações obtidas, o analista é capaz de definir medidas para o gerenciamento das falhas.

4.2.1 Análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA)

A análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA – *failure modes and effects analysis*) é uma técnica utilizada na análise de falha – aplicada às análises de qualidade, manutenibilidade, confiabilidade e risco –, para auxiliar no levantamento dos modos de falha em sistemas, subsistemas ou componentes, além da identificação das causas e efeitos de tais modo de falha. Segundo Bertsche (2008, p. 98), é a técnica mais comumente utilizada na análise qualitativa da confiabilidade com o intuito de alcançar um critério otimizado para

a avaliação da confiabilidade.

A FMECA, por sua vez, pode ser considerada como uma extensão da FMEA, pois a diferença está em um índice de criticidade (NPR – número de prioridade de risco) que permite priorizar as ações identificadas para evitar a ocorrência dos modos de falha ou a contenção dos efeitos. A técnica foi desenvolvida pelo departamento de defesa dos Estados Unidos e foi formalizada no procedimento militar MIL-P-1629, publicado originalmente em 9 de novembro de 1949. Apesar de existir esta distinção, é comum na literatura a definição da FMEA na qual o índice de criticidade é agregado à técnica. Segundo Sakurada (2001), por esta razão, não é possível definir ao certo a data em que a FMEA surgiu. Assim, para facilitar o entendimento, será adotado apenas o termo FMEA.

De acordo com Crowe et al. (2001), tradicionalmente a FMEA é uma técnica empregada após o projeto, para a verificação dos sistemas técnicos. Porém, aplicar a técnica na fase de projeto permite a otimização de diversos aspectos do sistema. Stamatís (1995) ressalta que a FMEA é aplicada para mapear o caminho para a melhoria contínua, podendo ser utilizada em qualquer fase do ciclo de vida e, de acordo com o tipo de aplicação, o autor estabelece quatro tipos distintos de FMEA, conforme apresentado no Quadro 4.1. Note-se que as definições dos tipos de FMEA apresentadas por Stamatís (1995) são direcionadas para as fases anteriores à fase de uso, porém, pode-se perceber que os tipos de FMEA são aplicáveis nas demais fases do ciclo de vida.

Quadro 4.1 – Tipos de FMEA

Tipo	Definição	Benefícios
FMEA de sistema	Utilizado na análise de sistemas e subsistemas nas primeiras fases de concepção e projeto, focando nos modos de falha potenciais que comprometem as funções, causados por deficiências do sistema.	<ul style="list-style-type: none"> – lista de modos de falha potenciais priorizados pelo NPR; – lista de funções do sistema que podem detectar modos de falha potenciais; e – lista de ações de projeto para eliminar modos de falha, problemas de segurança, e redução da ocorrência de modos de falha.

(continua na próxima página)

Quadro 4.1
(continuação)

Tipo	Definição	Benefícios
FMEA de projeto	Utilizado para a análise de produtos antes que estes cheguem à manufatura, focando nos modos de falha resultantes por erros de projeto.	<ul style="list-style-type: none"> – prioriza as ações de melhoria de projeto; – documenta as razões e os princípios seguidos para mudanças; – fornece informações para a verificação e teste de produtos; – identifica características críticas (comprometem a segurança ou normas) e significantes (atributo de qualidade sobre os quais dados devem ser coletados) do produto; – auxilia na avaliação de requisitos e alternativas de projeto; – identifica e permite eliminar problemas de segurança; e – identifica falhas do produto nas fases iniciais de desenvolvimento.
FMEA de processo	Utilizado para a análise dos processos de manufatura e montagem, focando nos modos de falhas resultantes dessas atividades.	<ul style="list-style-type: none"> – identifica deficiências do processo e permite a definição de um plano de ações corretivas; – identifica características críticas e significantes, auxiliando no desenvolvimento de um plano de controle; – prioriza ações corretivas; – auxilia a análise dos processos de manufatura e montagem; e – documenta as razões e os princípios seguidos para mudanças.
FMEA de serviço	Utilizado para a análise do produto antes que este chegue ao consumidor, focando nos modos de falha causados por deficiências no sistema ou processo.	<ul style="list-style-type: none"> – auxilia na análise do sistema e dos processos; – identifica deficiências nas tarefas a serem desempenhadas; – identifica tarefas críticas e significantes, permitindo o desenvolvimento de um plano de controle; – prioriza as ações de melhoria do serviço; e – documenta as razões e os princípios seguidos para mudanças.

Esta classificação da FMEA nos quatro tipos apresentados refere-se ao

problema que será analisado por meio desta técnica, ou seja, se o objetivo é analisar falhas em sistemas técnicos, no projeto, em processos ou serviços.

Pode-se ainda, identificar duas abordagens para a FMEA, de acordo com qual perspectiva a falha será analisada: a funcional e a estrutural. A abordagem funcional pode ser aplicada tanto para a análise de um sistema técnico como para a análise de um processo e, conforme o próprio nome sugere, os sistemas ou processos são avaliados de acordo com o cumprimento das funções identificadas. Neste caso, normalmente os modos de falha se caracterizam pelo não cumprimento de uma função. Já a abordagem estrutural, é centrada nas características dos componentes, tendo-se como exemplos de modos de falha: ruptura, desgaste, fadiga etc. Estas duas abordagens podem ser relacionadas por meio dos elementos que compõem a FMEA. A causa de um modo de falha na abordagem funcional é tratada como um modo de falha na abordagem estrutural. As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam exemplos de FMEA funcional e estrutural, respectivamente, aplicadas em um rádio para demonstrar como o sistema é tratado pelas duas abordagens.

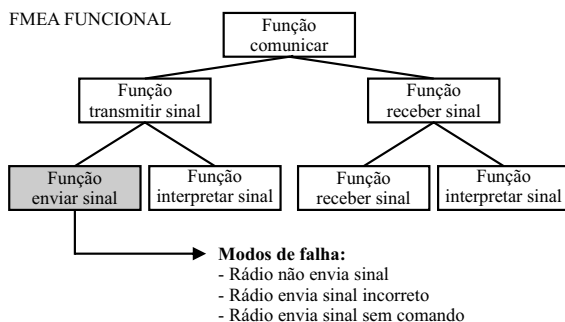


Figura 4.4 – FMEA funcional

Fonte: Adaptado de Ericson II (2005, p. 241)

A distinção entre as duas abordagens é um dos fatores que contribuem para a dificuldade em utilizar a técnica. A diferença pode ser verificada pela forma como a FMEA é tratada na literatura, principalmente quando a publicação é voltada à manutenção, ao projeto de produtos ou à análise de risco. Dias et al. (2011) fazem uma comparação entre as normas de MCC (SAE JA1011 e JA1012), as quais seguem uma abordagem funcional, e a norma SAE J1739, que segue uma abordagem estrutural. Apesar da diferença existente, é possível constatar que as duas abordagens podem ser perfeitamente combinadas pois, seguindo-se a abordagem funcional, conforme aumenta-se o nível de detalhamento a tendência é que o levantamento das causas passe a

FMEA ESTRUTURAL

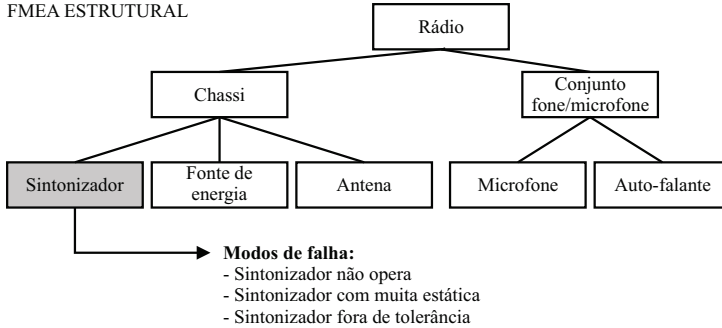


Figura 4.5 – FMEA estrutural

Fonte: Adaptado de Ericson II (2005, p. 241)

ser feito analisando-se subsistemas e componentes estruturalmente.

A definição e o entendimento claro dos termos utilizados é muito importante para o desenvolvimento de uma FMEA. De acordo com a experiência de quem utiliza a técnica, pode haver confusão quando se define um modo de falha, por exemplo. Segundo Dias et al. (2011), a definição dos termos está relacionada com o tipo de FMEA e a abordagem utilizada. Os autores chamam atenção ainda para a falta de consenso nas definições dos elementos da FMEA encontradas na literatura.

Assim, podem-se definir os elementos principais da FMEA da seguinte forma:

- **Modo de falha:** Sakurada (2001) define modo de falha como "a maneira que o componente em estudo deixa de executar a sua função ou desobedece as especificações. Na abordagem funcional, o modo de falha é caracterizado como a não-função. Já na abordagem estrutural, o modo de falha está associado a aspectos mais específicos dos componentes, peças ou partes do sistema, tais como resistência mecânica, carregamento e dureza.
- **Efeito:** o efeito é a maneira pela qual o modo de falha pode ser percebido, ou seja, as consequências da ocorrência do modo de falha. Enquanto o modo de falha ocorre internamente no sistema/componente, os efeitos são percebidos externamente (SAKURADA, 2001).
- **Causa:** as causas são os motivos que levam a ocorrência do modo de falha.

As informações levantadas por meio desta técnica são organizadas e disponibilizadas em forma de tabela conforme o exemplo da Figura 4.6, cujas colunas estão descritas no Quadro 4.2.

Item/ Função	Modo de falha	Efeito	S	Causas	O	Controles atuais	D	NPR	Ações reco- mendadas	Responsável	Ações executadas	S	O	D	NPR
1	2	3	4	Causa 1	5	Controle 1 Controle 2	7	280	Ação 1			8	2	2	32
Função 1	Modo de falha 1	Efeito 1 Efeito 2 Efeito 3	8	5	6	7	8	9	10	11	12	8	2	2	32
				Causa 2	7	Controle 3	7	392	Ação 2 Ação 3			8	2	2	32

Figura 4.6 – Exemplo de tabela de FMEA

Quadro 4.2 – Descrição das colunas da tabela FMEA

1	Nome da função do subsistema/componente que será analisado
2	Maneira que o componente em estudo deixa de executar a sua função ou desobedece as especificações
3	Maneira pela qual o modo de falha pode ser percebido
4	Índice que indica a severidade do efeito
5	Motivos que levam a ocorrência do modo de falha
6	Índice que indica a ocorrência da causa
7	Controles existentes para prevenir e detectar as causas
8	Índice que indica a dificuldade de detecção da causa
9	Número de prioridade de risco, obtido a partir do produto dos índices de severidade, ocorrência e detecção
10	Ações recomendadas para melhorar o controle sobre as causas
11	Responsável pela implementação das ações recomendadas
12	Ações recomendadas que foram implementadas
13	Novo número de prioridade de risco após a implementação das ações

A FMEA é utilizada para identificar ações que devem ser desenvolvidas para eliminar ou mitigar as causas e os efeitos relacionados aos modos de falha. A técnica também permite priorizar as ações a serem tomadas para gerenciar as causas dos modos de falha por meio do NPR, que normalmente é definido em face da severidade, da ocorrência e da dificuldade de detecção. A aplicação do projeto para confiabilidade requer estas informações para estruturar ações, ou barreiras, que eliminem as causas relacionadas ao tipo de

ocorrência da falha. Uma vez que estas ações são implementadas, ocorrem alterações na forma como o sistema falha, devendo-se atualizar a análise e avaliar novamente o NPR. Este aspecto iterativo da técnica por um lado traz benefício por permitir a atualização constantes da análise, mas de outro lado a representação das informações em forma de tabela dificultam entendimento sobre a análise e sua atualização.

Uma limitação importante da técnica está na falta do tratamento quantitativo das falhas. Apesar de permitir o uso do NPR, este índice é obtido de forma qualitativa, uma vez que são estabelecidos a partir da estimativa de especialistas com base na experiência acumulada sobre o sistema técnico em análise. Por esta razão, é comum utilizar a técnica em conjunto com a FTA, quando deseja-se detalhar as causas identificadas com a FMEA e obter uma análise quantitativa por meio da lógica booleana.

A técnica é executada por meio de reuniões envolvendo uma equipe formada especificamente para este fim, podendo-se encontrar dificuldades durante a execução de uma FMEA por envolver pessoas de diversas áreas de conhecimento dentro de uma organização que, combinada com a falta de conhecimento sobre a técnica, pode resultar em discussões prolongadas durante as reuniões. Por esta razão, deve haver um planejamento cuidadoso para que estes problemas possam ser administrados.

Por fim, um dos principais benefícios da técnica é a formalização do conhecimento dentro da organização. O conhecimento gerado pelos especialistas durante a análise dos modos de falha é registrado nas tabelas, passando por atualizações conforme esse conhecimento é aprofundado. Porém, a estrutura em forma de tabela pode dificultar o entendimento por parte de pessoas novas que passam a integrar a equipe, tornando-se necessário utilizar técnicas que facilitam o entendimento, tal como a CNEA.

4.2.2 Análise de eventos por rede causal (CNEA)

A CNEA (*causal network event analysis*) é uma técnica utilizada para a análise da ocorrência de um dado evento por meio da representação em rede causal. Com isso, pode-se mitigar a ocorrência e estabelecer as ligações entre o evento analisado, suas causas, suas consequências e as barreiras que atuam na corrente causal. A Figura 4.7 apresenta a estrutura básica de representação da CNEA.

A técnica foi desenvolvida pela equipe do Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NeDIP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) com base na técnica BTA (*bow-tie analysis*) que, por sua vez, é resultante da evolução dos diagramas causa-consequência da década de 1970 e

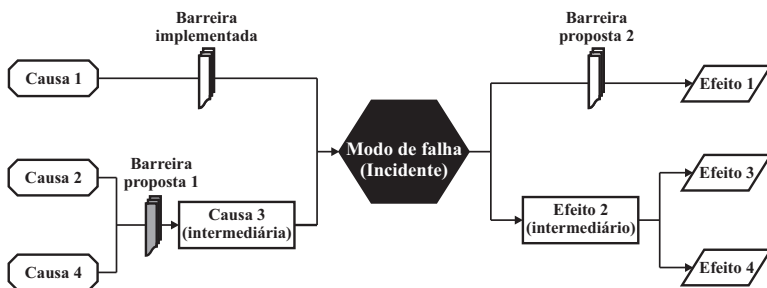


Figura 4.7 – Estrutura da técnica CNEA

dos diagramas de barreiras da década de 1980, tendo sido mais intensamente utilizada nas indústrias químicas e petroquímicas.

O desenvolvimento da CNEA se deu a partir da percepção de que a BTA não satisfaz o nível de detalhamento requerido para que a análise das causas e efeitos de um modo de falha seja completa, uma vez que apenas lista as causas e consequências de um evento, sem apresentar a relação entre eles. Assim, percebeu-se que redes causais poderiam ser utilizadas para solucionar as lacunas presentes na BTA e, desta forma, possibilitar o detalhamento das relações dentro das correntes causais.

Conforme pode ser observado na Figura 4.7, os diagramas CNEA permitem relacionar as causas raiz com causas intermediárias, entre a causa raiz e o modo de falha, possibilitando a atribuição de barreiras para evitar a propagação das causas até a ocorrência do modo de falha. Da mesma forma para os efeitos, os diagramas permitem relacionar efeitos intermediários até os efeitos finais do modo de falha, possibilitando a atribuição de barreiras para a contingência de eventos e evitar a ocorrência do evento final, que se deseja evitar. Os elementos da CNEA estão descritos na Figura 4.8

O principal benefício da técnica é a representação gráfica detalhada do relacionamento entre os eventos envolvidos na ocorrência das falhas. Ao contrário da FMEA que apenas lista tais eventos, a CNEA permite o seu relacionamento, o que facilita o entendimento sobre os mecanismos que levam à ocorrência das falhas (CALIL et al., 2009). Esta facilidade de entendimento torna mais simples a comunicação entre os participantes da análise. Note-se que as informações obtidas com as duas técnicas são equivalentes, o que permite utilizar a CNEA como um recurso gráfico para o desenvolvimento da FMEA.

A compreensão é de que as barreiras são as ações para, de um lado evitar ou mitigar as causas que potencializam os modos de falha, e de ou-









FIGURA	DESCRIÇÃO	FIGURA	DESCRIÇÃO
	Evento a se analisar, no caso, um incidente . Alguns autores adotam um círculo. Optou-se pelo hexágono para diferenciar da representação de causa raiz na FTA.	 OU 	Barreira preventiva já implementada que objetiva evitar a ocorrência do evento central ou mitigar seus efeitos.
	Efeito potencial que o evento central pode gerar.	 OU 	Barreiras preventiva proposta que deverá ser implementada.
	Causa ou efeito intermediário		
	Causa raiz para a ocorrência do evento central.		

Figura 4.8 – Elementos utilizados na representação gráfica da técnica CNEA
Fonte: Dias et al. (2011)

tro mitigar os efeitos resultantes da perda da função. Neste caso ainda, as barreiras podem constituir regras, normas, resoluções etc., utilizadas para o tratamento das contingências criadas para os efeitos, como por exemplo, planos de fuga, simulações de acidentes ou levantamento das contingências.

4.2.3 Árvore de falha (FTA)

A FTA é uma técnica dedutiva utilizada para identificar e relacionar as causas que levam a ocorrência de um dado evento, chamado de evento de topo. A técnica consiste em, a partir do evento de topo, desdobrar as causas e relacioná-las por meio de portas lógicas, até a obtenção das causas básicas condizentes com o nível de detalhamento requerido.

A técnica foi desenvolvida por H. A. Watson nos laboratórios Bell Telephone, sob contrato da Força Aérea dos Estados Unidos, para avaliar o sistema de mísseis intercontinentais Minutemen (ERICSON II, 2005).

A estrutura da FTA é denominada *top-down* ou pensamento reverso, uma vez que parte de um dado evento que se deseja estudar, para então identificar todas causas possíveis que levam a este evento (SAKURADA, 2001). A Figura 4.9 mostra um exemplo de representação da técnica. Conforme pode ser observado na figura, a estruturação da técnica consiste em estabelecer o evento de topo, identificar a porta lógica que representa a relação entre os eventos intermediários e assim sucessivamente até que as causas básicas sejam identificadas.

Dias et al. (2011) estabelecem os seguintes passos para desenvolver uma FTA:

- Planejamento da execução da FTA.

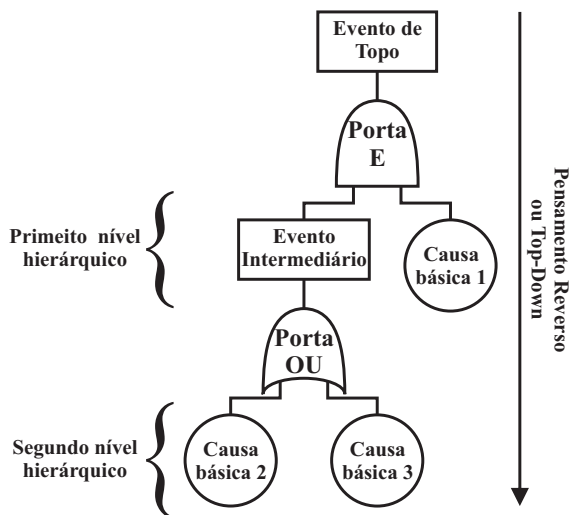


Figura 4.9 – Estrutura de representação da FTA
Fonte: Dias et al. (2011)

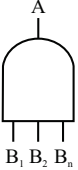

- Definição do sistema que será analisado.
- Desenvolvimento e validação da árvore.
- Análise e síntese de resultados.
- Planejamento das ações a partir dos resultados obtidos.

As portas lógicas são utilizadas na construção da FTA para determinar como se caracterizam os relacionamentos entre eventos. Entre estas portas, as principais são: a porta “E”, quando o evento de saída só ocorre se todos os de entrada ocorrerem simultaneamente; e “OU”, quando o evento de saída ocorre se ao menos um evento de entrada ocorre. Os símbolos de representação das portas estão apresentados no Quadro 4.3.

Além das portas lógicas, a técnica conta ainda com uma série de símbolos para a representação dos eventos, a saber (Figura 4.10):

- **Retângulo:** representa o evento de topo ou um evento intermediário.
- **Círculo:** representa as causas básicas ou raízes.
- **Losango:** representa eventos não analisados.

Quadro 4.3 – Principais portas lógicas da FTA

Nome	Símbolo	Probabilidade de ocorrência do evento de saída
Porta “E”		$F(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t)$
Porta “OU”		$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_i(t)]$

- **Oval:** representa eventos condicionais.
- **Pentágono ou Casa:** representa a possibilidade de simular ou não a ocorrência de certos eventos.
- **Triângulo:** representa a transferência ou cópia de uma ramificação.

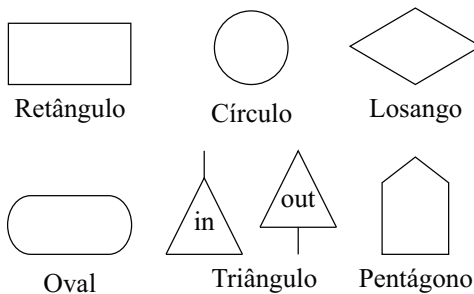


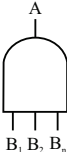

Figura 4.10 – Símbolos para a representação de eventos na FTA

Fonte: Dias et al. (2011)

Além de oferecer uma forma sistemática para a representação das causas que levam à ocorrência do evento de topo, os elementos gráficos utilizados

na técnica permitem utilizar lógica booleana para o cálculo da probabilidade de falha e da confiabilidade de sistemas. Para tanto, deve-se usar o equacionamento, como representado no Quadro 4.4 para as portas “E” e “OU” e as propriedades da álgebra booleana (DIAS et al., 2011), tais como associativa, comutativa, absorção, etc.

Quadro 4.4 – Álgebra booleana aplicada na FTA

Porta	Eventos	Equação Booleana	Tabela Verdade		
			A	B	Saída
E		$Sada = A.B$	A	B	Saída
			0	0	0
			0	1	0
			1	0	0
			1	1	1
OU		$Sada = A + B$	A	B	Saída
			0	0	0
			0	1	1
			1	0	1
			1	1	1

A principal vantagem em utilizar a técnica está no fato da técnica permitir analisar um evento isoladamente e relacionar todas as causas que podem levar à ocorrência de tal evento. Além disso, por tratar-se de uma técnica que utiliza elementos gráficos para representar o relacionamento entre as causas que levam ao evento de topo, a técnica permite o fácil entendimento sobre o sistema por tratar-se de uma ferramenta de comunicação visual.

4.2.4 Redes bayesianas

Pearl (1988) e Jensen & Nielsen (2007, p. 26) definem redes causais como “um conjunto de variáveis e um conjunto de ligações diretas (também denominadas arcos) entre variáveis”. sendo que as variáveis representam um grupo de possíveis estados conhecidos, ou proposições, sobre um dado sistema. No contexto da análise de falha, as variáveis podem ser a ocorrência ou não das causas de um dado modo de falha e os arcos representam as relações entre as causas e os modos de falha, tal como representado na técnica CNEA. Ou seja, neste caso as variáveis são os modos de falha, causas e efeitos, e os estados são “ocorre” e “não ocorre”.

As ligações entre as variáveis das redes causais podem ser em série,

divergentes ou convergentes, a saber:

- **Ligações em série:** de acordo com a Figura 4.11(a), uma evidência sobre a variável A (a certeza sobre a ocorrência ou não de A, por exemplo) influencia a certeza sobre a variável B que, por sua vez, influencia a certeza sobre a variável C. Porém, uma evidência sobre a variável B bloqueia a ligação entre A e C e, nesse caso, A e C são “d-separados” dado B.
- **Ligação divergente:** neste tipo de ligação, a evidência sobre um dado estado exerce influência sobre todos os seus filhos. No exemplo da Figura 4.11(b), a variável A tem como filhos as variáveis B e C, que se relacionam por meio da variável A. Da mesma forma que ocorre nas ligações em série, a certeza sobre a variável A (A está instanciada) torna B e C independentes, ou seja, as duas variáveis estão “d-separadas”.
- **Ligação convergente:** neste caso, observando-se a Figura 4.11(c), se não existe evidência alguma a respeito da variável A (se ela ocorre ou não ocorre, por exemplo), exceto o que pode ser concluído a partir das variáveis B e C que também não receberam evidência, pode-se dizer que as variáveis B e C estão “d-separadas”. Assim, considerando-se tais variáveis, e considerando que a variável A tem como causas os estados das variáveis B e C, a evidência a respeito de uma causa (B, por exemplo) não influencia a certeza sobre a outra causa (variável C). Porém, conhecendo-se o estado da variável A (consequência de B e C), uma evidência a respeito de uma causa (estado B, por exemplo) pode fornecer alguma certeza sobre a outra causa (estado C).

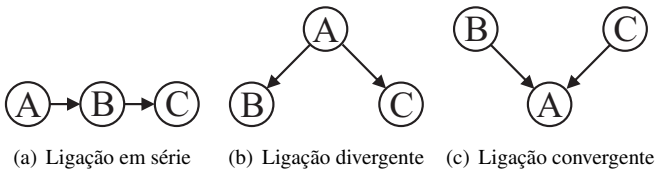


Figura 4.11 – Tipos de ligações em redes causais

Os três tipos de ligações apresentados, assim como o conceito de “d-separadores”, permitem estabelecer a relação de dependência entre as variáveis modeladas nas redes causais, considerando-se as evidências sobre as variáveis. Assim, as redes causais podem ser usadas para determinar como a alteração da certeza sobre uma variável do sistema influencia a certeza sobre

uma outra variável qualquer. Na análise de confiabilidade de um dado sistema técnico, as variáveis podem ser, por exemplo, modos de falha, causas, efeitos e barreiras de prevenção das causas ou contingência dos efeitos.

As redes bayesianas por sua vez são redes causais nas quais se estabelece a força da ligação entre as variáveis, por meio das probabilidades condicionais. A definição de Pearl (1988) estabelece as redes bayesianas como grafos acíclicos direcionados (DAG – *directed acyclic graph*) nos quais os nodos representam as variáveis, os arcos direcionados representam a existência de influência causal direta entre as variáveis e a força da ligação é expressada pelas probabilidades condicionais. Portanto, por definição, as redes bayesianas consistem em (JENSEN; NIELSEN, 2007):

- Um conjunto de variáveis e um conjunto de ligações entre as variáveis (arcos direcionados).
- Cada variável possui um número finito de estados mutuamente exclusivos.
- As variáveis, em conjunto com as ligações, formam grafos acíclicos direcionados (DAG), de tal forma que não existe um caminho que comece e termine na mesma variável, como exemplificado na Figura 4.12.
- Para um conjunto de variáveis relacionadas por ligações diretas, existe uma tabela de probabilidades condicionais.

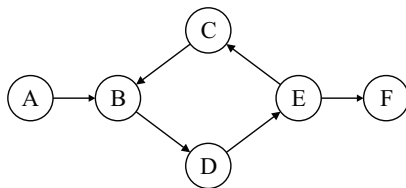


Figura 4.12 – Exemplo de relação entre eventos que não permite o uso de redes bayesianas

O cálculo da força das ligações entre as variáveis é feito por meio do teorema de Bayes, o qual é representado pela seguinte equação:

$$P(B|A) = \frac{P(A|B) \cdot P(B)}{P(A)} \quad (4.1)$$

Onde,

- $P(A|B)$ é a probabilidade de ocorrer o evento A , dado que ocorreu o evento B (a posteriori);
- $P(B|A)$ é a probabilidade de ocorrer o evento B , dado que ocorreu o evento A (likelihood);
- $P(A)$ é a probabilidade de ocorrer o evento A (a priori); e
- $P(B)$ é a probabilidade de ocorrer o evento B (a priori).

É importante destacar que a probabilidade $P(B|A)$ é obtida experimentalmente a partir da evidência que o evento A ocorreu. O teorema de Bayes poderia ser utilizado, por exemplo, para se obter a probabilidade de um rolamento estar quebrado (evento A) dado que está havendo vibração (evento B) em um dado sistema técnico. A probabilidade $P(B|A)$ é obtida a partir de testes nos quais o rolamento é danificado e a probabilidade de haver vibração é medida.

Segundo Dias et al. (2011), a utilização do teorema de Bayes para representar as relações entre as variáveis, no mesmo sentido do delineamento, tem a vantagem de permitir a visualização da influência entre as variáveis, facilitando a comunicação e permitindo a automatização do processo de cálculo.

A utilização de redes bayesianas tem a vantagem de possibilitar a representação gráfica da relação entre eventos combinada com o cálculo da probabilidade de sua ocorrência dadas as evidências existentes sobre os eventos. Além disso, a técnica permite tratar incertezas, estabelecendo-se, por exemplo, valores de probabilidade para a ocorrência ou não de um dado evento. Com isso, é possível simular diferentes situações e verificar os resultados dentro da rede causal. Aplicando-se na análise de falha, por exemplo, é possível verificar qual a influência de uma barreira estabelecida para evitar um efeito de um modo de falha.

Por fim, a dependência de dados estatísticos é um fator que dificulta a implementação da técnica. Porém, pode-se consultar especialistas e estabelecer valores iniciais estimados para as probabilidades e então coletar dados para a atualização da rede. Assim, é possível utilizar o modelo obtido com a técnica para orientar a coleta de dados estatísticos em campo, ou por meio de simulações, para obter dados fiéis à realidade.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresentou algumas técnicas aplicadas na análise de falha. Apesar de bastante consolidadas, apresentarem benefícios e serem utilizadas em diversas áreas da engenharia, as técnicas apresentam limitações

que muitas vezes dificultam o trabalho dos analistas.

Em alguns casos é comum a utilização combinada entre técnicas, tal como a utilização da FTA para detalhar as causas dos modos de falha identificados com a aplicação da FMEA, uma vez que esta técnica tem a limitação de não estabelecer as relações entre as causas que levam ao modo de falha. Porém é possível constatar ainda que a técnica apresenta outras limitações, tais como a dificuldade de entendimento devido a sua representação em tabelas e a falta de tratamento quantitativo das falhas.

Assim, o Capítulo 5 apresenta uma proposta que possibilita o uso combinado das técnicas de análise de falha que possibilita sanar as dificuldades e limitações de cada técnica.

5 USO COMBINADO DAS TÉCNICAS DE ANÁLISE DE FALHA

O uso combinado entre as técnicas de análise de falha apresentadas tem como objetivo a obtenção de um modelo detalhado do sistema técnico que possibilite a identificação clara de medidas a serem tomadas para evitar a ocorrência de falhas, ou controlar os efeitos, e a consequente melhoria da confiabilidade. O modelo de análise tem como base a FMEA, contando com as demais técnicas para contornar as suas limitações, além de possibilitar a obtenção de informações complementares e auxiliar a elicitación do conhecimento.

Conforme apresentado anteriormente, a principal dificuldade encontrada na utilização da FMEA está na definição dos elementos que compõem a técnica que, por sua vez, ocorre de acordo com o tipo de FMEA (sistema, projeto, processo ou serviço) e a abordagem utilizada.

Dadas as características das técnicas utilizadas, devem-se estabelecer algumas regras ou procedimentos que facilitem a integração. Na representação das funções de um sistema técnico utilizando a análise funcional de produtos, por exemplo, deve-se tomar o cuidado para que os as funções dos subsistemas e componentes possibilitem a integração entre os diagramas CNEA desenvolvidos para cada modo de falha identificado, conforme será detalhado mais adiante. Para a utilização combinada de redes bayesianas com os diagramas CNEA, por sua vez, um restrição existente é que os eventos representados não podem representar um caminho fechado que comece e termine no mesmo evento – por exemplo, quando um evento A gera um evento B que, por sua vez, pode gerar o evento A novamente. Devido aos problemas que podem ser encontrados, foram estabelecidos alguns procedimentos que englobam os cuidados a serem tomados para que o analista possa integrar as técnicas sem grandes dificuldades.

A Figura 5.1 apresenta os passos a serem seguidos para o desenvolvimento da análise de falhas. De acordo com este modelo, o analista pode optar por desenvolver uma análise mais básica, na qual as informações obtidas e registradas em planilhas de FMEA satisfazem as necessidades, como tradicionalmente é feito, ou dar continuidade à análise, detalhando-se ainda mais as falhas do sistema técnico por meio das técnicas CNEA, FTA e redes bayesianas. Para a aplicação do modelo, o principal cuidado que se deve ter envolve a identificação das funções do sistema. Ao final da utilização das técnicas, quando aplicadas durante o projeto, pode-se então identificar e implementar as ações de projeto para confiabilidade, avaliar as informações obtidas e realimentar a análise.

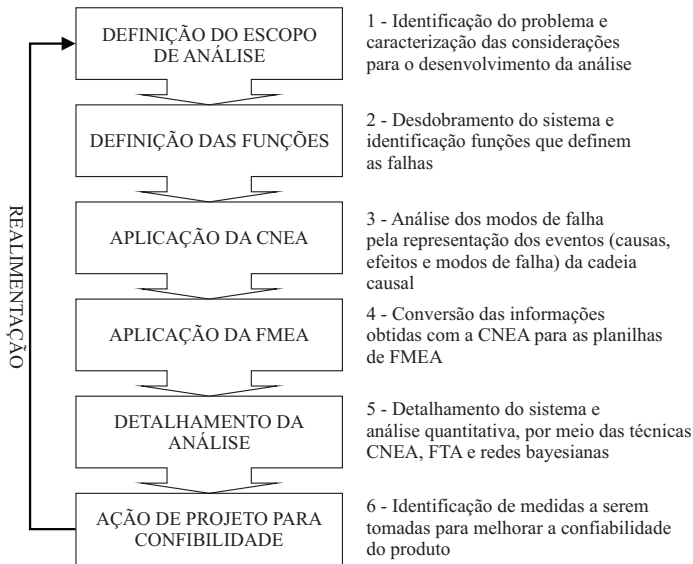


Figura 5.1 – Passos para a aplicação do modelo de análise

5.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO DE ANÁLISE

Considerando-se a complexidade dos sistemas técnicos analisados, a dificuldade que pode ser encontrada no desenvolvimento da análise de falha e confiabilidade depende diretamente da definição clara do seu escopo. O escopo de análise define como o sistema será abordado, influenciando nas considerações adotadas pelo analista para, por exemplo, desdobrar o sistema em subsistemas e componentes.

Um mesmo sistema pode desempenhar uma série de funções, mas de acordo com o objetivo da análise algumas funções podem ser consideradas e outras não. Se o objeto de análise, por exemplo, forem aspectos relacionados ao desempenho, dirigibilidade ou segurança de um carro, os diferentes subsistemas que o compõem (como motor, transmissão, pneus) exercem relevâncias distintas.

O escopo define também o nível de detalhamento da análise. Para os efeitos de um dado evento, por exemplo, é importante ter definido até que ponto o analista deve chegar em suas considerações. Assim, a definição clara do escopo estabelece se o sistema será tratado de forma global ou se será desdobrado em subsistemas e componentes. Voltando ao exemplo do carro,

dependendo do escopo, ao avaliar os efeitos de um pneu furado deve-se ter definido se é necessário considerar apenas os efeitos sobre a dirigibilidade ou se devem ser considerados os efeitos sobre os passageiros, por exemplo, de acordo com os objetivos estabelecidos para a análise.

Assim como ocorre com os efeitos, o escopo de análise define até que ponto os subsistemas e componentes serão desdobrados e detalhados (principalmente para o levantamento das causas dos modos de falha), possibilitando tornar o trabalho mais objetivo e aproveitar informações já conhecidas. Na análise de um sistema hidráulico, por exemplo, em muitos casos elementos como bombas e válvulas já foram analisados em algum momento, existindo informações disponíveis que podem ser utilizadas para complementar a análise. Com isso, torna-se desnecessário desdobrar a bomba ou a válvula em seus componentes mais básicos.

5.2 DESDOBRAMENTO E DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES DO SISTEMA TÉCNICO

O princípio de utilização das técnicas apresentadas no presente trabalho consiste em analisar o sistema técnico em partes, utilizando a técnica mais adequada, para então relacionar estas partes e obter um modelo do sistema como um todo. Dadas as técnicas envolvidas, devem-se fazer algumas considerações durante o desenvolvimento da análise para que a combinação, tanto das técnicas quanto das partes do sistema, se dê de forma correta. O levantamento das funções é uma das etapas da análise que devem seguir regras, como apresentado na Figura 5.2, após a definição do escopo.

O modelo para o uso combinado das técnicas de análise de falha está centrada na técnica FMEA, contando com a técnica CNEA para facilitar a representação e o entendimento da cadeia causal, além de outras técnicas para aumentar o nível de detalhamento do sistema. Considerando-se as abordagens da FMEA (estrutural e funcional), optou-se pela funcional, uma vez que esta permite maior liberdade ao analista. Esta característica da abordagem funcional ocorre devido à subjetividade presente na identificação das funções, o que permite ao analista agrupar subsistemas e componentes e definir as subfunções necessárias para o cumprimento da função global. Com isso é possível analisar os subsistemas, componentes e suas funções separadamente e depois combinar as informações para obter uma análise do sistema global. Para isso, é necessário estabelecer uma relação sequencial entre os subsistemas, os componentes e suas funções.

Se os subsistemas e componentes desdobrados do sistema técnico forem definidos de forma que as subfunções necessárias para o cumprimento da

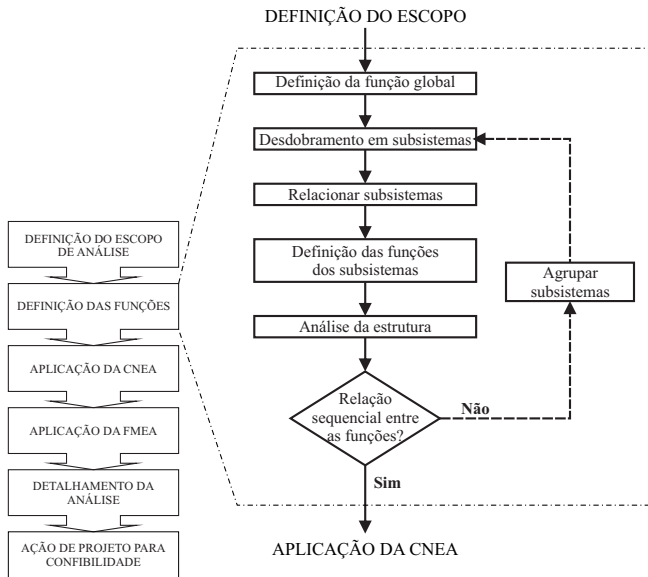


Figura 5.2 – Passos para a definição das funções do sistema

função global tenham uma relação sequencial, ou seja, que o cumprimento da função de um dado subsistema/componente seja necessário para que a função do subsistema/componente seguinte possa ser cumprida, os dois podem ser relacionados por meio das causas e efeitos do não-cumprimento das funções (modo de falha funcional). Conforme representado na Figura 5.3 quando uma dada função 1 deve ser cumprida para ser possível executar uma função 2, sob a abordagem funcional, a função 1 é uma causa da falha funcional da função 2 que, por sua vez, é um efeito da falha funcional da função 1.

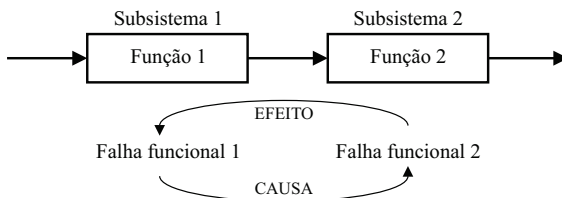


Figura 5.3 – Relacionamento entre subsistemas de acordo com as falhas funcionais

É importante ressaltar que, observando-se o sistema técnico pelo ponto de vista estrutural, ou seja, relacionando seus subsistemas e componentes simplesmente de acordo com seus aspectos construtivos, é possível perceber que não faz muito sentido estabelecer uma relação sequencial entre as partes. Porém, sob a visão funcional essa relação pode ser obtida, uma vez que as funções do sistema técnico podem ser definidas e desdobradas a critério de quem faz a análise, e os subsistemas e componentes podem ser relacionados de acordo com a necessidade para o cumprimento das funções. Por esta razão, é interessante utilizar a análise funcional de produtos (ou síntese funcional) para a representação das funções do sistema – ou a técnica IDEF0 para o caso da análise ser aplicada em processos –, uma vez que a técnica oferece ao analista a liberdade necessária para se obter um modelo que cumpre essas características.

Para o sistema hidráulico apresentado na Figura 5.4 – que poderia, por exemplo, ser utilizado em uma prensa hidráulica para estampar uma peça – a função global pode ser definida como “mover matriz da prensa com uma força específica”. Como a movimentação do cilindro hidráulico depende da vazão de fluido e conseqüente aumento da pressão do sistema, o relacionamento entre os subsistemas e suas funções podem ser estabelecidos de acordo com esta seqüência de funções.

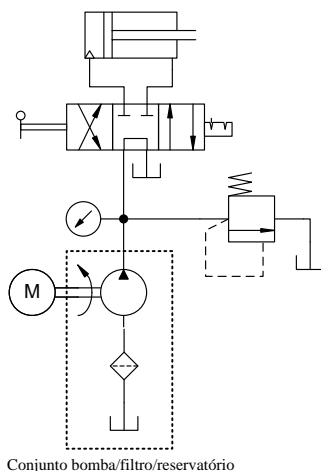


Figura 5.4 – Exemplo de sistema técnico

Desta forma, é possível relacionar os subsistemas e componentes como apresentado na Figura 5.5. Para o cumprimento da função global, em um

primeiro nível de detalhes, devem-se cumprir as funções parciais “fornecer vazão de fluido”, “direcionar a vazão do fluido” e “mover a matriz”, cujos subsistemas/componentes responsáveis são o subsistema de potência (motor, bomba, reservatório, filtro, etc), a válvula direcional e o atuador, respectivamente.

Note-se que para que a relação sequencial seja estabelecida, alguns componentes precisam ser agrupados e, caso seja necessário, desdobrados posteriormente. A bomba hidráulica depende da energia mecânica fornecida pelo motor e do fluido proveniente do filtro que, por sua vez, recebe o fluido do reservatório. Como o motor é um componente mais complexo, que possivelmente oferece maior chance de falhas, é interessante que seja analisado separadamente, optando-se por tratar a bomba, o filtro e o reservatório como um único subsistema. Assim, o motor, o subsistema bomba/filtro/reservatório, a válvula direcional e os demais componentes podem ser relacionados sequencialmente. Além disso, o reservatório está ligado tanto ao filtro quanto à válvula de alívio, mas como sua função é a mesma, ele pode ser analisado apenas dentro do subsistema bomba/filtro/reservatório.

É importante destacar ainda que, da mesma forma que o conjunto bomba/filtro/reservatório, a válvula direcional, o manômetro e a válvula de alívio também foram tratadas como um único subsistemas, que também pode ser desdobrado e analisado em detalhes posteriormente. Como o manômetro e a válvula de alívio não exercem funções que influenciam diretamente o cumprimento da função global, mas exercem funções de suporte à função da válvula direcional (proteção do sistema), estes componentes são tratados como um único subsistema para assegurar que, caso o mesmo sistema hidráulico seja analisado por equipes distintas, o resultado seja o mesmo.

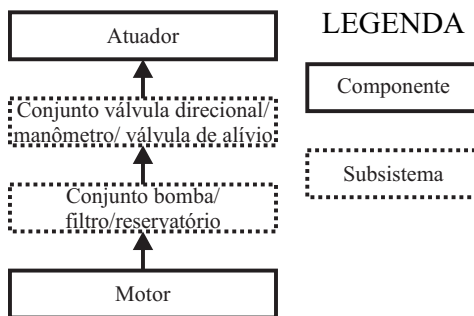


Figura 5.5 – Exemplo de relacionamento entre subsistemas e componentes

Com este exemplo, é possível entender os passos a serem seguidos na

definição das funções, apresentados na Figura 5.2. Após o desdobramento, relacionamento dos subsistemas e definição das funções, deve-se avaliar a estrutura de representação das funções do sistema técnico obtida e verificar se a estrutura representa uma relação sequencial entre as mesmas, possibilitando o relacionamento entre as partes da análise global e das técnicas. Caso contrário a estrutura deve ser revisada – reagrupando-se subsistemas ou componentes –, de forma que a estrutura obtida se torne adequada. O relacionamento entre as partes da análise global se dá por meio da técnica CNEA, conforme será detalhado a seguir.

5.3 COMBINAÇÃO FMEA/CNEA

Tradicionalmente, na análise de falhas em sistemas técnicos, a FMEA é a técnica mais consolidada e utilizada. Sob o ponto de vista do mantenedor, a aplicação da FMEA tem como objetivo levantar os efeitos dos modos de falha, para que o analista possa definir ações sobre os efeitos (manutenção corretiva) ou sobre os modos de falha (manutenção preventiva/preditiva). Por outro lado, na visão da análise de risco, deve-se antecipar a ocorrência dos modos de falha, dadas as consequências mais severas, tornando-se importante a análise das causas para estabelecer barreiras que evitem a propagação de eventos dentro da cadeia causal. Por esta razão, a técnica CNEA é interessante, uma vez que possibilita o relacionamento das diferentes causas que levam a ocorrência do modo de falha estudado.

A partir da identificação das funções e subfunções do sistema técnico, é possível identificar os modos de falha (eventos que devem ser evitados), os quais sob o ponto de vista funcional caracterizam-se pelo não-cumprimento de uma dada função. No caso do sistema hidráulico da Figura 5.4, um modo de falha para o subsistema bomba/filtro/reservatório pode ser identificado como “subsistema não fornece vazão”. Para cada modo de falha, aplicando-se a técnica CNEA é possível identificar as suas causas-raiz, as causas intermediárias e suas relações, assim como os efeitos finais e intermediários. A Figura 5.6 representa como as causas e efeitos são relacionados com o modo de falha.

A integração da CNEA com a FMEA ocorre de forma direta. Porém, a CNEA identifica as causas intermediárias entre uma causa-raiz e o modo de falha, enquanto a FMEA lista apenas as causas-raiz. Por outro lado, a FMEA lista todos os efeitos de um modo de falha, tanto intermediários quanto finais, porém sem a distinção entre eles. Além disso, para que as duas técnicas sejam combinadas, as barreiras identificadas nos diagramas CNEA devem ser diferenciadas em controles atuais (CT) – barreiras já implantadas –, e planos

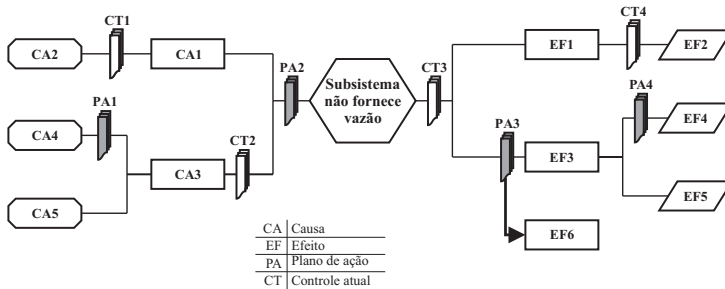


Figura 5.6 – Exemplo de diagrama CNEA

de ação (PA) – barreiras propostas. Assim, a tabela da FMEA correspondente ao diagrama CNEA da Figura 5.6 pode ser obtida transportando os elementos identificados no diagrama para dentro da tabela, conforme apresentado na Figura 5.7.

Componente	Função	Modo de Falha	Efeitos (EF)	Causas (CA)	Controles atuais (CT)	Planos de ação (PA)			
Subsistema bomba/filtro/reservatório	Fornecer vazão de óleo	Subsistema não fornece vazão	Efeito 1 Efeito 2 Efeito 3 Efeito 4 Efeito 5 Efeito 6	Causa 2	Controle atual 1	Plano de ação 2			
					Controle atual 3	Plano de ação 3			
					Controle atual 4	Plano de ação 4			
				Causa 4	Controle atual 2	Plano de ação 1			
					Controle atual 3	Plano de ação 2			
					Controle atual 4	Plano de ação 3			
				Causa 5		Plano de ação 4			
					Controle atual 2	Plano de ação 2			
					Controle atual 3	Plano de ação 3			
								Controle atual 4	Plano de ação 4

Figura 5.7 – Exemplo de relação entre diagrama CNEA e tabela FMEA

Comparando-se as duas técnicas, torna-se evidente que a CNEA oferece maior riqueza em detalhes na representação das causas e efeitos dos modos de falha. Com isso, a técnica permite contornar a dificuldade de elicitación do conhecimento inerente à FMEA, resultante da forma de representação das informações em tabelas (CALIL et al., 2009). Um problema comum durante a utilização da FMEA está na dificuldade de se chegar a um consenso quanto à definição dos modos de falha, causas e efeitos. Isso ocorre principalmente devido ao envolvimento de especialistas de diversas áreas e com nível de conhecimento variado. Com a utilização da CNEA, é possível explicitar o conhecimento dos especialistas de forma gráfica, facilitando o entendimento e a utilização das técnicas.

A CNEA permite ainda, caso o analista tenha optado por analisar o

sistema em partes (cada subsistema analisado separadamente, por exemplo), relacionar as partes analisadas por meio das causas e efeitos das partes. Para isso foram definidas as regras para a identificação das funções do sistema e seus subsistemas. Voltando ao exemplo do sistema hidráulico da Figura 5.4, os modos de falha do motor, que levam ao não cumprimento da função “fornecer energia mecânica para a bomba”, podem ser tratados como causa dos modos de falha do conjunto bomba/filtro/reservatório que levam ao não cumprimento da função “Fornecer vazão de óleo para a válvula direcional”, em decorrência da sequência atribuída na Figura 5.5.

Portanto, é possível perceber que a utilização combinada das duas técnicas traz vantagens tanto para facilitar o desenvolvimento da análise quanto para aumentar o nível de detalhes obtidos. Caso seja necessário, o modelo apresentada permite ainda que o analista aplique outras técnicas para detalhar ainda mais o sistema técnico.

5.4 DETALHAMENTO DA ANÁLISE UTILIZANDO AS TÉCNICAS CNEA/FTA E REDES BAYESIANAS

A forma mais comum de se desenvolver a análise de falhas consiste em utilizar a técnica FMEA que, por sua vez, é limitada à análise qualitativa. Além de facilitar a elicitación do conhecimento e melhorar o entendimento sobre o relacionamento entre as causas e efeitos dos modos de falha, a técnica CNEA permite ainda a utilização combinada de redes bayesianas para obter a probabilidade de ocorrência dos eventos dentro da cadeia causal.

Esta análise quantitativa deve ser desenvolvida a critério do analista, caso exista a necessidade de acordo com os resultados esperados da análise, ou seja, a partir do escopo deve-se ter definido se a saída desejada da análise é uma tabela de FMEA com os modos de falha, suas causas e efeitos, se é necessário a obtenção das probabilidades de falha, qual o nível de detalhamento desejado, etc. Por esta razão, após a aplicação da técnica FMEA, deve-se avaliar se o nível de detalhamento sobre as falhas do sistema técnico é suficiente ou se é necessário aprofundar a análise. A Figura 5.8 apresenta o diagrama de tomada de decisão para a seleção da técnica apropriada para a análise do sistema.

De acordo com a Figura 5.8, o primeiro ponto que deve ser observado é se existem subsistemas complexos – compostos por um grande número de componentes ou que possam ser desdobrados em outros subsistemas. Isso porque nesses casos, faz-se necessário aplicar novamente a técnica CNEA, dadas as vantagens descritas anteriormente.

Caso seja necessário detalhar um subsistema pouco complexo ou um

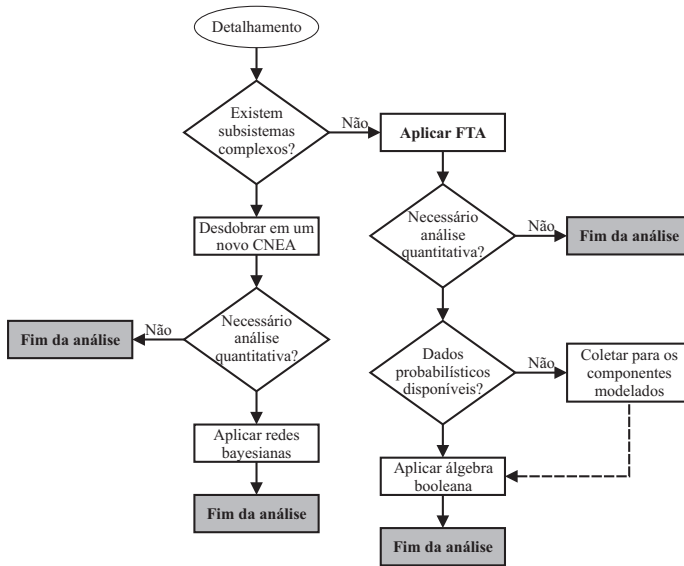


Figura 5.8 – Diagrama de tomada de decisão para a seleção da técnica de análise

componente, é aconselhável utilizar a técnica FTA dada a facilidade do uso e a possibilidade de obter uma análise quantitativa por meio da lógica booleana, conforme descrito anteriormente. A FTA pode ser utilizada, por exemplo, no detalhamento das causas-raiz ou nas barreiras identificadas nos diagramas CNEA, como pode ser observado na Figura 5.9

Para os subsistemas cuja análise foi desenvolvida utilizando a técnica CNEA, é possível obter uma análise quantitativa aplicando-se redes bayesianas para avaliar as probabilidade de ocorrência das causas, modos de falha e efeitos representados nos diagramas.

Por definição as redes bayesianas são grafos que não podem começar e terminar em um mesmo nóculo. Por essa razão, para que as redes bayesianas possam ser aplicadas nos diagramas CNEA, estabelecendo as probabilidades condicionais entre os eventos modelados, deve-se tomar o cuidado para que o relacionamento entre os eventos respeite as regras atribuídas às redes bayesianas. Por essa razão, ao utilizar a técnica CNEA não se deve representar eventos (modos de falha, causa e efeitos) dentro da cadeia causal que apresentem relacionamento cíclico, como exemplificado na Figura 4.12. Para contornar esse tipo de problema deve-se agrupar algumas funções, subsiste-

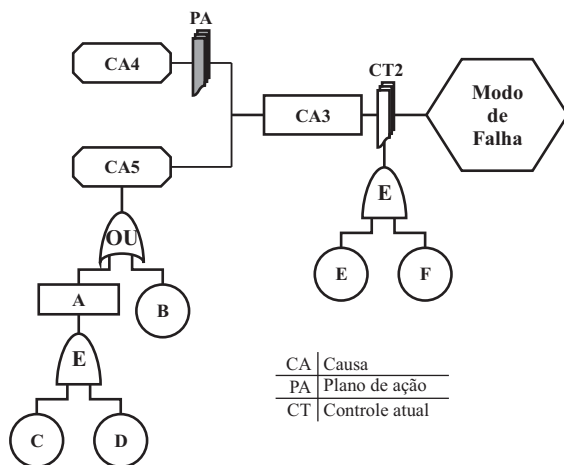


Figura 5.9 – Uso da FTA para o detalhamento de causa-raiz da CNEA

mas e/ou componentes para que a representação do sistema se torne adequada, para então desdobrá-los posteriormente.

Uma vez que os diagramas CNEA respeitem as regras estabelecidas para a aplicação das redes bayesianas as duas técnicas podem ser combinadas de forma direta. As Figuras 5.10(a) e 5.10(b) apresentam um diagrama CNEA hipotético e a rede bayesiana resultante, respectivamente.

As representações gráficas das duas técnicas são bastante semelhantes. A barreira “CT1” (que é um controle atual) influencia apenas a probabilidade de ocorrência do modo de falha, da mesma forma que a causa “CA1”. Note-se que as redes bayesianas permitem modelar um evento resultante de uma barreira ser eficaz ou não. Na Figura 5.10(a), por exemplo, caso a barreira “PA2” seja eficaz, o efeito “EF4” ocorrerá, caso contrário ocorrerá o efeito “EF3”. Dias et al. (2011) chama essa relação de evento derivativo. Note-se que na Figura 5.10(b), o efeito “EF4” só depende do modo de falha e da barreira “PA2”, uma vez que ele só ocorre se a barreira “PA2” não for eficaz e, por esta razão, não depende da barreira “CT3”.

As probabilidades resultantes da combinação entre diferentes estados dos eventos modelados na rede – uma causa que ocorre/não ocorre ou uma barreira eficaz/ineficaz, por exemplo –, que levam à ocorrência de um dado evento final podem ser obtidas utilizando-se uma tabela de relacionamento das probabilidades condicionais. O Quadro 5.1, apresenta como são definidas as probabilidades de ocorrência do “Efeito 2” (EF2), pertencente à rede da

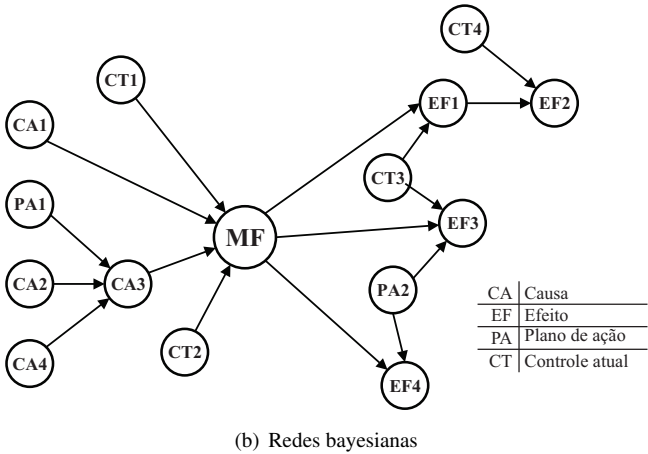
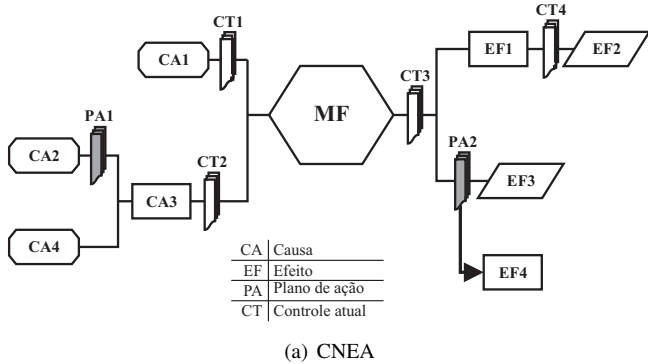


Figura 5.10 – Aplicação de redes bayesianas nos diagramas CNEA

Figura 5.10(b), dadas as probabilidades de ocorrência do “Efeito 1” (EF1) e a eficácia do “Controle atual 4” (CT4)¹. Aplicando-se então os conceitos de probabilidade condicional, obtém-se o valor final do evento que se deseja analisar.

Note-se que ao modelar as relações condicionais entre os eventos da rede, é possível avaliar a influência da certeza de ocorrência de um dado evento sobre a probabilidade de ocorrência dos demais. Na Figura 5.10(b), ao modelar as relações probabilísticas da rede é possível avaliar, por exemplo, qual a influência da certeza sobre a ocorrência da Causa 1 (CA1) sobre a ocorrência do modo de falha, e os demais eventos. Desta forma o analista conta

¹Valores hipotéticos apenas para exemplificação

com uma ferramenta bastante útil para avaliar o comportamento do sistema técnico.

Quadro 5.1 – Tabela de relacionamento das probabilidades condicionais utilizadas nas redes bayesianas

Efeito 1 (EF1)	Controle atual 4 (CT4)	Efeito 2 (EF2)	
		Ocorre	Não ocorre
Ocorre	Eficaz	0,05	0,95
Ocorre	Ineficaz	0,98	0,02
Não ocorre	Eficaz	0	1
Não ocorre	Ineficaz	0	1

Assim, a partir do que foi exposto, pode-se concluir que a utilização combinada das técnicas de análise de falha, apesar de exigir alguns cuidados, permite solucionar os problemas encontrados para a desenvolvimento da análise tradicional – baseada na técnica FMEA –, assim como o desenvolvimento de uma análise mais detalhada que permite a avaliação quantitativa das falhas.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do capítulo buscou-se evidenciar a importância do processo de identificação e desdobramento das funções dos sistemas analisados. Isso porque a sistematização apresentada para a análise de falha consiste em analisar o sistema em partes (desdobramento em subsistemas e componentes) utilizando as diferentes técnicas e então relacionar as informações para avaliar o sistema como um todo. O relacionamento entre as técnicas e as partes analisadas do sistema é feito por meio das funções.

De maneira geral, a aplicação do modelo de análise consiste nos seguintes passos:

- Definição do escopo de análise: a partir do escopo são definidos aspectos como quais as saídas esperadas da análise (tabelas com os modos de falha, causas e efeitos, probabilidade de ocorrência das falhas, qual o nível de detalhamento etc.), quais as fronteiras para a identificação das causas e efeitos dos modos de falha, se processos de operação e manutenção serão tratados, etc.
- Definição das funções: aplicando-se a análise funcional de produtos (ou síntese funcional se a análise for durante o projeto), identificam-se

as principais funções parciais necessárias para o cumprimento da função global, bem como os subsistemas/componentes diretamente responsáveis pelo seu cumprimento, para então organizar subsistemas e componentes para se obter uma relação sequencial entre as funções.

- Aplicação da técnica CNEA: para cada função identificada são identificados modos de falha, cujo levantamento das causas e efeitos, bem como seu relacionamento, é feito com o auxílio dos diagramas CNEA, os quais facilitam a visualização e o entendimento das relações causa-efeito.
- Aplicação da FMEA: os diagramas CNEA são convertidos nas tradicionais tabelas de FMEA
- Detalhamento da análise: caso seja necessário detalhar algum item específico ou a obtenção das probabilidades de ocorrência das causas, modos de falha ou efeitos, pode-se aplicar as técnicas FTA ou redes bayesianas, dependendo de qual técnica é mais adequada e da existência de dados estatísticos.

Vale ressaltar que para assegurar o relacionamento sequencial, subsistemas e componentes muitas vezes devem ser tratados em conjunto, de acordo com sua relevância para o cumprimento da função global. Esta relevância pode ser percebida ao aplicar a análise funcional, tendo em vista que normalmente é possível identificar um subsistema/componentes principal, responsável pelo cumprimento das funções parciais de nível superior (mais próximas da função global). A partir da identificação do subsistema/componente mais relevante, os de menor relevância devem ser “encapsulados” e tratados junto com o de maior relevância, assegurando-se que o modelo obtido seja o mesmo, independente da equipe envolvida com a análise.

O modelo de análise tem como base a técnica FMEA, utilizada segundo a abordagem funcional, uma vez que é a técnica usualmente aplicada na análise de falha. Entretanto, para o levantamento das informações contidas nas planilhas de FMEA foi utilizada a técnica CNEA, que permite representar graficamente os eventos dentro da cadeia causal e diminuir a dificuldade existente na utilização da FMEA, além de possibilitar a utilização de redes bayesianas para o desenvolvimento de uma análise quantitativa. Com isso, buscou-se solucionar dois problemas básicos da FMEA: dificuldade de eliciação do conhecimento e limitação à análise qualitativa.

Se as funções e subfunções do sistema forem identificadas da forma correta, os diagramas CNEA desenvolvidos para os diferentes subsistemas podem ser relacionados por meio das causas e efeitos dos modos de falha. Se forem aplicadas redes bayesianas em conjunto com os diagramas CNEA

é possível, inclusive, obter um valor de probabilidade de falha do sistema global, dada alguma evidência sobre as causas dos diferentes modos de falha.

O modelo apresentada para uso integrado de técnicas (Figura 5.1) permite desenvolver a análise tradicional caracterizada pela aplicação da FMEA ou optar pelo detalhamento. Na Figura 5.8 é possível notar ainda que durante o detalhamento, o analista tem a liberdade para determinar o final da análise em diversos pontos. Essa decisão é tomada de acordo com o nível de detalhamento desejado e a disponibilidade de dados estatísticos.

Vale ressaltar que a flexibilidade do modelo permite analisar subsistemas e componentes de forma distinta. Em alguns casos, pode ser interessante detalhar uma causa ou uma barreira identificada como crítica utilizando por exemplo, a FTA. Em outros, é possível que existam dados estatísticos disponíveis para a aplicação de redes bayesianas em algum subsistemas específico. De qualquer forma, cabe ao analista definir até que ponto é possível chegar ao desenvolver a análise de acordo com os resultados esperados. As redes bayesianas, por exemplo, só são utilizadas quando for exigido resultados quantitativos da análise.

Por fim, em muitos casos a inexistência de dados estatísticos ou o pouco conhecimento sobre o sistema podem inviabilizar a aplicação de alguma técnica ou o detalhamento de alguma parte específica do sistema. Porém, como o modelo obtido pode sofrer constantes atualizações, é interessante tomá-lo como referência para o levantamentos de dados e sua realimentação, para que se possa contar com uma representação cada vez mais fiel ao comportamento real do sistema. No capítulo seguinte, será apresentado um exemplo de utilização das técnicas apresentadas.

6 APLICAÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE DE FALHA

O conjunto de técnicas apresentado neste trabalho foi aplicado sobre o sistema hidráulico de acionamento (SHA) do leme do navio Itabuna, já analisado em projeto de pesquisa (BIASOTTO, 2008). O projeto foi desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Universidade de São Paulo (PNV-USP) em conjunto com o Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP), e financiado com recursos da PETROBRAS (Petróleo Brasileiro S. A.) e da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), como parte da implantação e consolidação de um laboratório (LABRISCO) para análise e avaliação de risco em sistemas navais e oceânicos. Como parte da consolidação do laboratório foi realizada a análise e avaliação de risco associados à operação de sistemas de governo e carga/descarga instalados em navios da frota da TRANSPETRO (Petrobras Transporte S.A.).

A opção por aplicar o modelo sobre um sistema previamente analisado é decorrente de três fatos: o foco do trabalho está no uso das técnicas de análise de falha; a utilização das técnicas é feita da mesma forma, tanto na etapa de projeto quanto na etapa de uso do ciclo de vida; e aplicando-se em um sistema previamente analisado, é possível avaliar de forma mais concreta os benefícios que o modelo oferece.

Com isso, buscou-se demonstrar de forma clara os procedimentos a serem seguidos para o uso combinado das técnicas de análise de falha, de forma que o modelo possa ser utilizada na análise de outros sistemas, voltada ao projeto para confiabilidade.

6.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

O sistema hidráulico de acionamento (SHA) da máquina do leme fornece vazão constante e é responsável por mover a cana do leme por meio de dois pares de atuadores hidráulicos. O sistema pode ser dividido em cinco subsistemas (Figura 6.1):

- **Subsistemas de potência:** o SHA conta com dois subsistemas de potência, sendo um em *stand-by*, responsáveis por fornecer a vazão de óleo necessária para pressurizar o sistema e mover os atuadores hidráulicos.
- **Subsistema de atuação:** o subsistema de atuação é composto por dois pares de cilindros hidráulicos que, na condição normal, atuam em conjunto sobre a cana do leme.

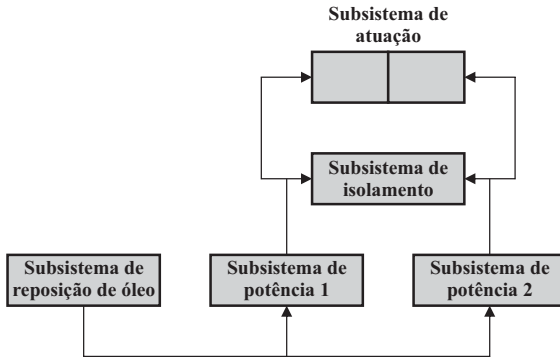


Figura 6.1 – Diagrama estrutural do sistema hidráulico de acionamento do leme de navio

Fonte: Biasotto (2008)

- **Subsistema de isolamento:** responsável pela conexão entre os dois pares de cilindros hidráulicos. Em caso de emergência, o subsistema opera isolando um dos pares, o que reduz pela metade a capacidade de mover a cana do leme.
- **Subsistema de reposição de óleo:** normalmente isolado por válvulas de esfera, o subsistema só opera em caso de nível baixo nos reservatórios dos subsistemas de potência e isolamento.

O diagrama hidráulico completo pode ser observado na Figura 6.2.

A opção por desenvolver a análise no sistema de acionamento do leme deve-se à importância que este tem sobre a dirigibilidade do navio. Como a ocorrência de falhas neste item pode gerar consequências desastrosas para a embarcação, os conceitos de confiabilidade exercem grande importância dentro do projeto. Assim sendo, chegou-se à conclusão que a análise deste sistema seria uma boa aplicação para as técnicas desenvolvidas nesta dissertação.

6.2 DEFINIÇÃO DO ESCOPO DE ANÁLISE, DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A ocorrência de falhas no sistema hidráulico pode resultar em consequências não só para o funcionamento do sistema de governo do navio como para toda a embarcação. Por esta razão, o sistema hidráulico pode operar tanto na condição normal, como em condição de emergência, quando o

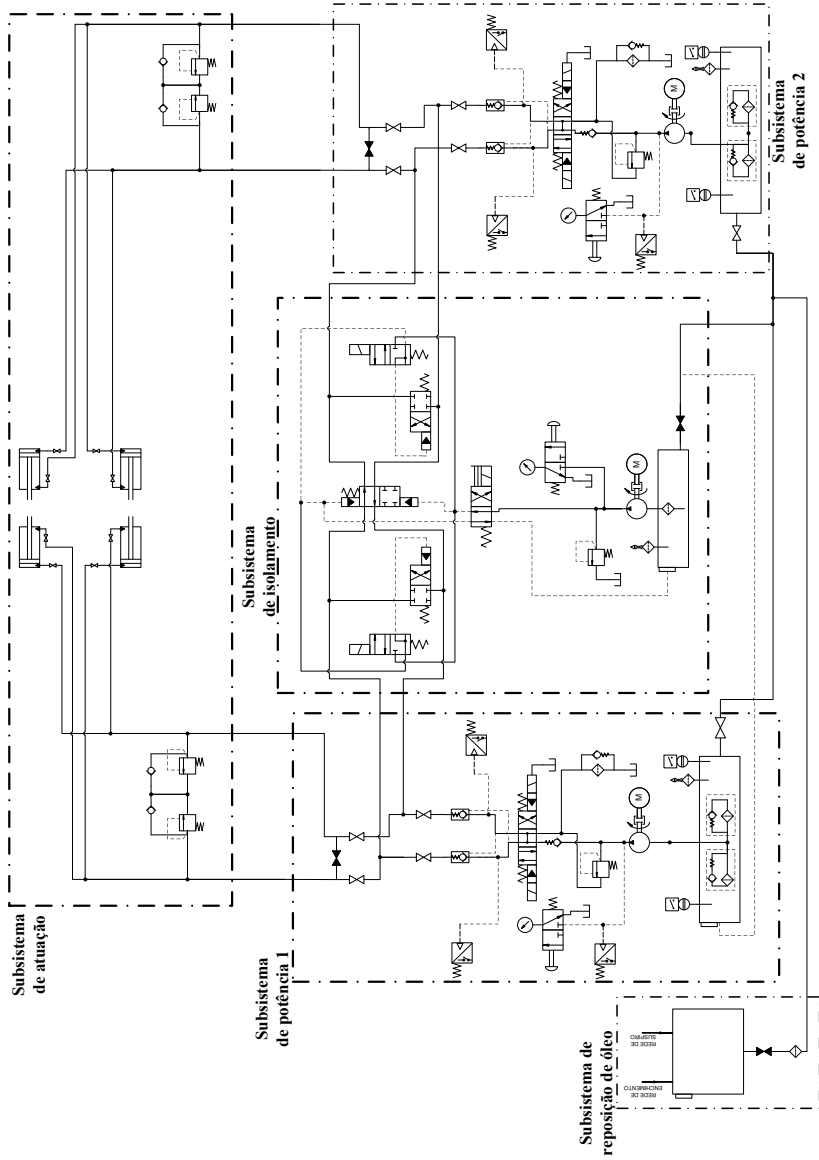


Figura 6.2 – Diagrama hidráulico da máquina do leme

subsistema de isolamento atua tornando um dos pares de cilindros hidráulicos inativo. Como o objetivo deste trabalho é apresentar a combinação das técnicas de análise de falha, considerando-se também a complexidade do sistema, o escopo de análise foi delimitado de acordo com as seguintes considerações:

- Projeto concebido de acordo com recomendações dos fabricantes dos componentes: considera-se que os componentes do sistema hidráulico foram corretamente dimensionados no projeto.
- Sistema hidráulico de acionamento operando na condição normal: neste caso o subsistema de isolamento exerce apenas a função de conectar os dois pares de cilindros hidráulicos e o subsistema de reposição de óleo encontra-se em *stand-by*.
- Foco da análise no funcionamento do sistema hidráulico: o levantamento dos efeitos de modos de falha será limitado pelo sistema hidráulico, ou seja, até a movimentação dos cilindros hidráulicos.

Idealmente, o sistema deve ser analisado para todas as condições de operação. A principal delas é a condição normal, uma vez que eventos ocorridos dentro desta podem levar às demais condições de operação. O sistema opera na condição de emergência, por exemplo, caso ocorram vazamentos em um dos pares de cilindros hidráulicos. Neste caso, a unidade de potência do subsistema de isolamento atua, fornecendo vazão de óleo que comanda as válvulas do bloco de isolamento.

Aplicando-se o modelo de análise para uma das condições de operação, pode-se facilmente replicar o trabalho para as demais condições. Por esta razão, optou-se por demonstrar a utilização das técnicas na análise do sistema dentro da condição normal de operação.

Da mesma forma, uma vez aplicada sobre uma parte do SHA, o modelo pode ser facilmente replicada para as demais. Assim, a análise teve ênfase no subsistema de potência.

6.3 DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES DO SISTEMA

O sistema foi analisado em partes, seguindo-se uma abordagem funcional, a qual oferece liberdade para que os subsistemas e componentes possam ser desdobrados de tal forma que tanto as técnicas utilizadas quanto as partes analisadas separadamente possam ser relacionadas.

O primeiro passo para a aplicação do modelo consiste no desdobramento e identificação das funções do sistema. Na condição normal de ope-

ração, a função global do SHA pode ser definida conforme apresentado no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Função global do sistema hidráulico de acionamento (SHA)

Mover a madre do leme para a posição desejada, em um tempo especificado, e manter a posição de modo estável

Dadas as considerações definidas no escopo, principalmente ao fato da análise considerar o sistema operando na condição normal, os subsistemas que compõem o SHA (representados na Figura 6.1), foram tratados da seguinte forma:

- **Subsistema de potência 1:** responsável por fornecer a vazão de óleo necessária para pressurizar o sistema e movimentar os atuadores hidráulicos.
- **Subsistema de potência 2:** na condição normal o subsistema de potência 2 encontra-se em *stand-by*, não exercendo função para a operação do sistema.
- **Subsistema de isolamento:** na condição normal é responsável apenas por permitir a ligação entre o subsistema de potência com os dois pares de cilindros hidráulicos.
- **Subsistema de atuação:** recebe a vazão de óleo e movimenta a cana do leme por meio dos cilindros hidráulicos.
- **Subsistema de reposição de óleo:** na condição normal, considera-se que o nível de óleo é adequado para o funcionamento do sistema, não exercendo função na operação do SHA.

Na condição de operação considerada, o subsistema de potência 2 e o subsistema de reposição de óleo, não exercem funções relevantes para a operação do SHA, podendo ser desconsiderados durante a análise. Assim, o SHA pode ser simplificado e desdobrado, em um primeiro nível, nos subsistemas representados na Figura 6.3.

A forma como os subsistemas estão desdobrados na Figura 6.3 tem o objetivo de viabilizar o relacionamento sequencial entre as funções dos subsistemas identificados. Dessa forma, o subsistema de potência deve cumprir sua função para que o subsistema de isolamento possa cumprir sua função e assim sucessivamente até que o SHA possa cumprir sua função global.

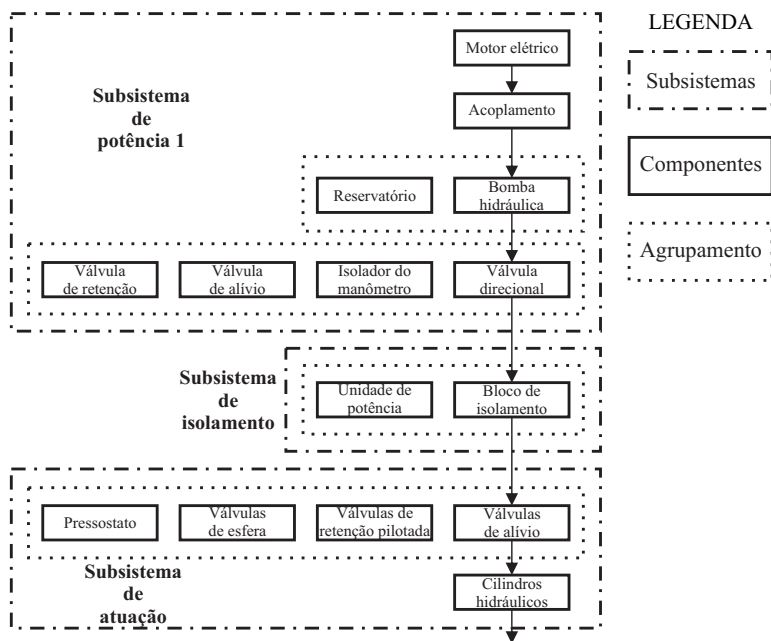


Figura 6.3 – Desdobramento do SHA em subsistemas

Note-se que os componentes dos subsistemas de potência, isolamento e atuação foram tratados da mesma forma. O reservatório e a bomba hidráulica do subsistema de potência foram agrupados e tratados como um outro subsistema. Com isso, caso decida-se por analisar os subsistemas/componentes do subsistema de potência separadamente, estes elementos podem ser relacionados da mesma forma, por meio das funções.

Aplicando-se a análise funcional no SHA, as funções parciais dos subsistemas que o compõem (potência, isolamento e atuação), em um primeiro nível, podem ser identificadas de acordo com a Figura 6.4.

Como nesta condição de operação o subsistema de isolamento exerce apenas a função de conectar subsistema de potência 1 aos dois pares de cilindros hidráulicos do subsistema de atuação, sob o ponto de vista funcional, este pode ser tratado como um único elemento, apesar de ser possível desdobrá-lo estruturalmente na unidade de potência e no bloco de isolamento. Neste caso, o subsistema de isolamento apresenta apenas um modo de falha funcional, que pode ser definido como “Não transmitir fluido do subsistema de potência ao subsistema de atuação”. Assim, este subsistema pode ser analisado de

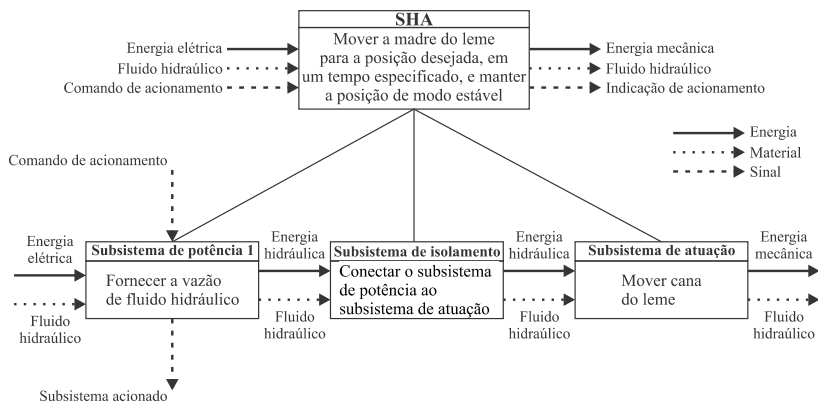


Figura 6.4 – Análise funcional do SHA para os subsistemas de primeiro nível

forma mais simplificada sem comprometer os resultados obtidos na análise do sistema global.

Esta abordagem permitiu o relacionamento sequencial entre as funções dos subsistemas desdobrados. Ou seja, para que o subsistema de atuação cumpra sua função “Mover cana do leme”, é necessário que o subsistema de isolamento cumpra a função “Conectar o subsistema de potência ao subsistema de atuação” que, por sua vez, necessita que o subsistema de potência cumpra sua função “Fornecer vazão de fluido hidráulico”. Com isso, os subsistemas puderam ser analisados separadamente e então relacionados por meio das funções, possibilitando avaliar o sistema global, conforme descrito no Capítulo 4.

Este raciocínio se dá por meio das causas e efeitos dos modos de falha dos diagramas CNEA desenvolvidos para cada subsistema. Por exemplo, como a função “Mover cana do leme” do subsistema de atuação depende que o subsistema de isolamento cumpra a função “Conectar o subsistema de potência ao subsistema de atuação”, os modos de falha identificados para o subsistema de isolamento atuam como causas dos modos de falha do subsistema de atuação.

Da mesma forma como foi feito para a função global, os subsistemas podem ter suas funções desdobradas em subfunções. O subsistema de potência, por exemplo, pode ser desdobrado em componentes e funções elementares, como apresentado na Figura 6.5.

É importante ressaltar que o desdobramento funcional dos subsistemas deve ser feito de acordo com o nível de detalhamento que será aplicado na análise. Neste exemplo, as técnicas CNEA e FMEA foram aplicadas para

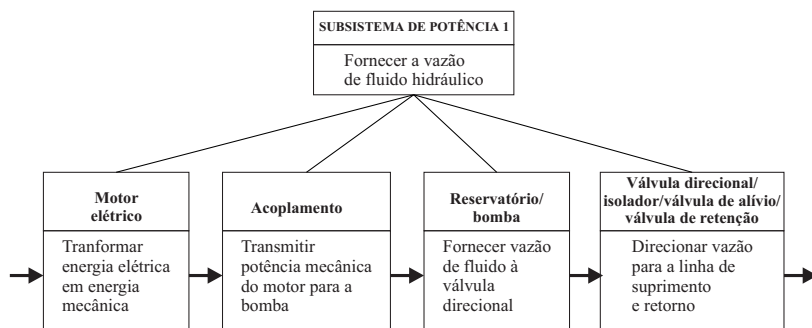


Figura 6.5 – Desdobramento funcional do subsistema de potência

analisar as falhas que levam ao não cumprimento das funções dos subsistemas de potência, isolamento e atuação. Assim, a perda das funções dos componentes do subsistema de potência descritos na Figura 6.5 serão representadas como causas dos modos de falha analisados nos diagramas CNEA.

6.4 APLICAÇÃO DA TÉCNICA CNEA

A técnica CNEA foi aplicada com o intuito de detalhar as falhas que levam ao não cumprimento das funções identificadas dos subsistemas que compõem o SHA. Para o subsistema de potência desdobrado na Figura 6.5, um modo de falha identificado é "Subsistema de potência não fornece a vazão desejada". As causas e os efeitos deste modo de falha foram levantadas utilizando a técnica CNEA, cujo diagrama resultante está apresentado em duas partes nas Figuras 6.6 e 6.7, para as causas e efeitos respectivamente.

Com a relação sequencial entre as funções dos subsistemas de potência e isolamento, é possível combinar os diagramas CNEA obtidos por meio das causas e efeitos dos respectivos modos de falha. Na Figura 6.8 é possível perceber que o modo de falha "Subsistema de potência não fornece a vazão desejada", do subsistema de potência, atua como causa para o não cumprimento da função "Conectar o subsistema de potência ao subsistema de atuação". Assim, o CNEA resultante para o subsistema de isolamento tem como causa o modo de falha do subsistema de potência. Da mesma forma, o modo de falha do subsistema de isolamento entra como causa no CNEA desenvolvido para o subsistema de atuação.

Este relacionamento entre CNEAs só é possível se as funções do sistema forem identificadas corretamente, conforme citado anteriormente. Caso

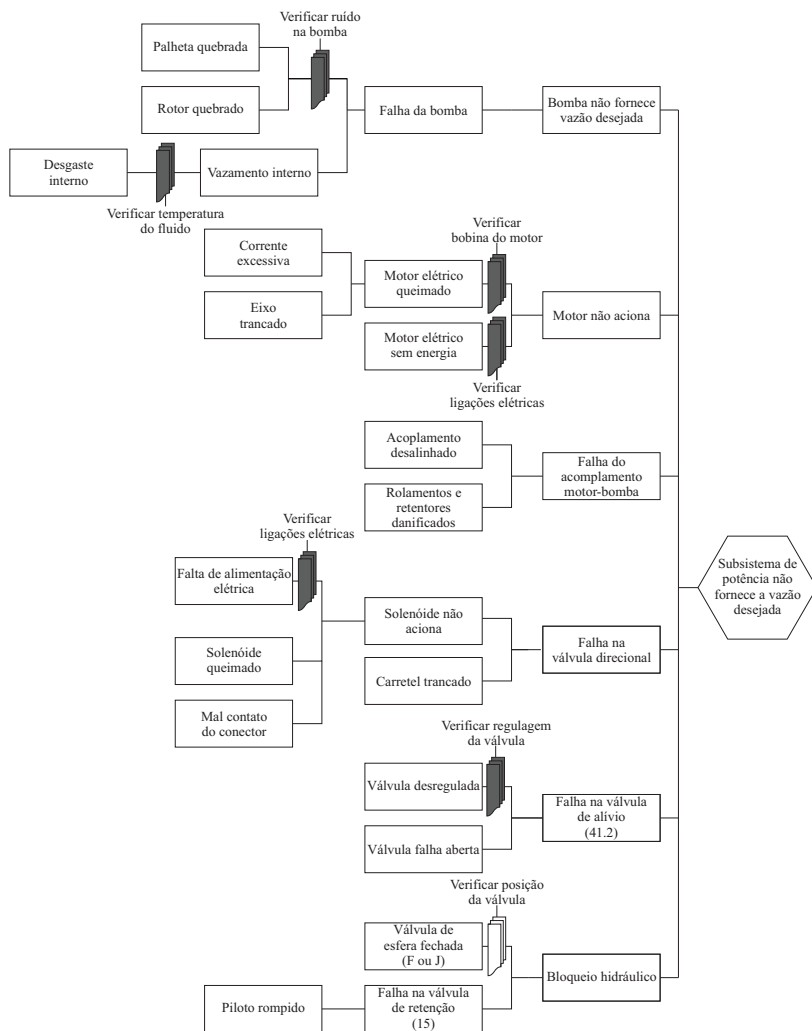


Figura 6.6 – Causas do diagrama CNEA do subsistema de potência

a relação sequencial entre as funções dos subsistemas não seja estabelecida, o analista deve reorganizar os subsistemas e componentes de forma que seja possível identificar subfunções necessárias para o cumprimento da função global que apresentem este tipo de relação.

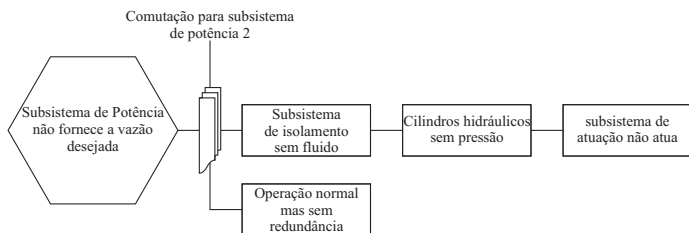


Figura 6.7 – Efeitos do diagrama CNEA do subsistema de potência

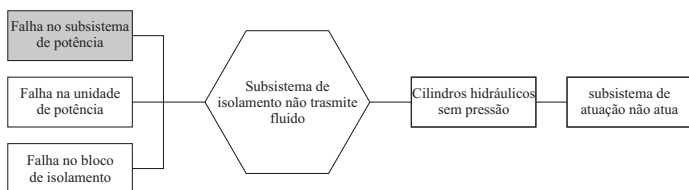


Figura 6.8 – Relacionamento entre os CNEAs do subsistema de potência e do subsistema de isolamento

6.5 COMBINAÇÃO CNEA/FMEA

A combinação das técnicas CNEA e FMEA se dá de forma direta, conforme descrito no Capítulo 4. Para o CNEA desenvolvido para o modo de falha “Subsistema de potência não fornece a vazão desejada”, apresentado nas Figuras 6.6 e 6.7, a tabela FMEA correspondente está apresentada no Quadro 6.2.

Como pode ser observado, as técnicas se combinam muito bem. A conversão da CNEA em FMEA é feita de forma direta, listando-se os eventos representados nos diagramas dentro da tabela. Além disso, é possível perceber que, caso a análise exija o cálculo do NPR, os diagramas CNEA permitem adicionar campos nas caixas que representam as causas e o modo de falha para auxiliar a determinação dos índices de severidade, ocorrência e dificuldade de detecção.

A representação gráfica dos diagramas CNEA auxilia no entendimento das informações contidas na tabelas de FMEA. Além disso, as redes causais permitem detalhar as causas intermediárias entre as causas-raiz e o modo de falha, o que possibilita estabelecer barreiras para evitar a propagação das cau-

sas.

Quadro 6.2 – Tabela de FMEA do subsistema de potência

Componente	Função	Modo de falha	Efeitos	Causas	Controles atuais	Plano de ação
Subsistema de potência	Fornecer vazão de fluido hidráulico	Subsistema de potência não fornece vazão	Subsistema de isolamento sem fluido Cilindros hidráulicos sem pressão Subsistema de atuação não atua Operação normal mas sem redundância	Palheta quebrada	Comutação para o subsistema de potência 2	Verificar ruído na bomba
				Rotor quebrado	Comutação para o subsistema de potência 2	Verificar ruído na bomba
				Desgaste	Comutação para o subsistema de potência 2	temperatura do fluido
				Corrente excessiva	Comutação para o subsistema de potência 2	Verificar bobina do motor
				Eixo travado	Comutação para o subsistema de potência 2	Verificar bobina do motor
				Motor elétrico sem energia	Comutação para o subsistema de potência 2	Verificar ligações elétricas
				Acoplamento desalinhado	Comutação para o subsistema de potência 2	
				Rolamentos e retentores danificados	Comutação para o subsistema de potência 2	
				Falta de alimentação elétrica	Comutação para o subsistema de potência 2	Verificar ligações elétricas
				Solenóide queimado	Comutação para o subsistema de potência 2	
				Mal contato no conector	Comutação para o subsistema de potência 2	
				Válvula de alívio desregulada	Comutação para o subsistema de potência 2	regulagem da válvula
Válvula de alívio falha aberta	Comutação para o subsistema de potência 2					
Válvula de esfera fechada	Comutação para o subsistema de potência 2	Verificar posição da válvula				
Piloto da válvula de retenção rompido	Comutação para o subsistema de potência 2					

No lado dos eventos, a CNEA também permite estabelecer as relações entre os efeitos intermediários, possibilitando estabelecer barreiras que contêm os efeitos, evitando-se assim a ocorrência dos efeitos finais que podem ter consequências catastróficas.

6.6 DETALHAMENTO DA ANÁLISE

Conforme apresentado no Capítulo 4 de acordo com a necessidade do analista e a disponibilidade de informações, pode-se optar por detalhar o sistema além da aplicação da FMEA. No caso do subsistema de potência, dados os componentes que o compõem, a aplicação de um novo diagrama CNEA para detalhar tais componentes é desnecessária. Por essa razão, optou-se por aplicar a FTA em alguns componentes.

Para a causa-raiz “Corrente excessiva”, que leva ao não acioamento do motor elétricos, foi desenvolvida uma FTA, visando identificar os eventos que levam à sua ocorrência, conforme representada na Figura 6.9. Devido à falta de dados estatísticos para se obter uma análise quantitativa, não foi realizada a análise utilizando lógica booleana.

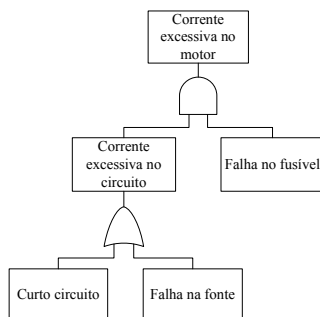


Figura 6.9 – FTA da causa-raiz “Corrente excessiva”

Porém, foi desenvolvida uma rede bayesiana para uma das ramificações da CNEA do modo de falha “Subsistema de potência não fornece a vazão desejada” a partir de dados estimados, buscando-se obter um valor inicial para a probabilidade de ocorrência da causa “Falha na bomba” (Figura 6.10). A partir do modelo obtido, espera-se orientar a coleta de informações que possibilite obter a probabilidade real de ocorrência da causa. Ao aplicar a técnica, foi possível perceber a dificuldade em se obter as informações de probabilidade de ocorrência dos eventos modelados na rede, uma vez que normalmente

os dados disponíveis referem-se às taxas de falha de componentes tratados individualmente, desconsiderando a ocorrência de acordo com a condição dos demais componentes. Além disso, as informações disponíveis em bancos de dados como o OREDA (*Offshore Reliability Data*) não diferenciam muito bem o tipo de aplicação dos componentes.

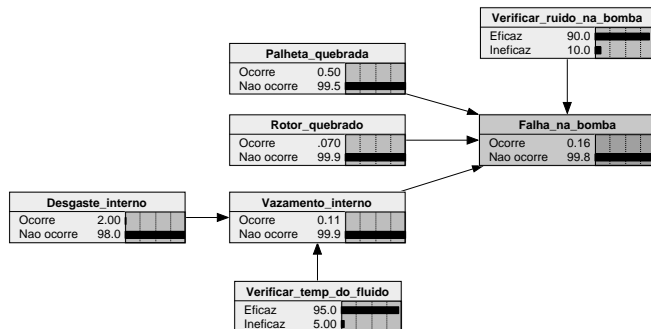


Figura 6.10 – Rede bayesiana aplicada à causa “Falha na bomba”

Dessa forma, foi possível perceber que a utilização das redes é mais interessante quando aplicada visando orientar a coleta de dados que alimentarão as redes utilizando as tabelas de probabilidades condicionais, conforme exemplificado na Figura 6.11. Note-se que a técnica oferece ainda a possibilidade de tratar a incerteza, a qual traz grande benefício pois permite obter uma estimativa inicial das probabilidades. Por outro lado, é importante destacar que, conforme pode ser observado na Figura 6.11, para a aplicação da rede há que ter uma quantificação das probabilidade de ocorrência e de não ocorrência dos eventos em análise, para que se obtenha a probabilidade de ocorrência do evento final.

Vazamento_interno Table (in net SS_potencia)			
Node: Vazamento_interno		Apply	Okay
Chance	% Probability	Reset	Close
Desgaste_interno	Verificar_temp_do_fluido	Ocorre	Nao ocorre
Ocorre	Eficaz	2	98
Ocorre	Ineficaz	70	30
Nao ocorre	Eficaz	0	100
Nao ocorre	Ineficaz	0	100

Figura 6.11 – Tabela de probabilidades condicionais do nó “Vazamento interno”

6.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Capítulo 6, foi apresentada uma aplicação do modelo proposta para o uso combinado de técnicas de análise de falha, sobre o sistema hidráulico de acionamento do leme do navio Itabuna. Apesar do modelo estar contextualizada no projeto para a confiabilidade, a aplicação foi realizada em um sistema já existente e analisado em projeto de pesquisa. Com isso, buscou-se avaliar o modelo de forma mais concreta.

Foi possível perceber que a forma de tratar as funções do sistema de fato permite o relacionamento entre os subsistemas. Conforme demonstrado, o relacionamento entre CNEAs de diferentes subsistemas por meio das causas, efeitos e modos de falha, ocorreu conforme o esperado, permitindo relacionar todos os subsistemas e obter a análise do sistema global. A análise do sistema em partes também contribui para simplificar o entendimento sobre o sistema técnico.

Por outro lado, de acordo com a complexidade do sistema analisado, a obtenção do relacionamento sequencial entre as funções pode se mostrar um tanto complicada, principalmente em sistemas que possuem subsistemas de controle que atuam sobre a diversos outros subsistemas.

Durante a análise do SHA foi possível perceber também que as técnicas CNEA e FMEA se combinam perfeitamente. Os elementos que compõem as duas técnicas são bastante equivalentes, e a CNEA traz o grande benefício da representação gráfica das relações entre os eventos que compõem a cadeia causal. Vale ressaltar ainda que ao desenvolver a análise de forma gráfica, por meio da técnica CNEA, as inter-relações entre eventos a partir do modo de falha são realçadas, o que por sua vez facilita a capacitação do grupo envolvido na análise do sistema técnico.

Além de combinar muito bem com a FMEA, a CNEA também funciona muito bem em conjunto com a FTA. Conforme foi apresentado, a FTA pode ser aplicada pontualmente para detalhar algum evento específico, como uma causa-raiz ou uma barreira.

Por fim, as redes bayesianas também se mostraram aderentes à CNEA, uma vez que as duas técnicas tem como princípio a representação de eventos por meio de redes causais. Por outro lado, deve prestar atenção para o fato das redes bayesianas não permitirem relação cíclica entre eventos. Além disso, de acordo com a disponibilidade de informações, a obtenção das probabilidades condicionais para os cálculos da redes pode ser tornar complexa, ou seja, há que ter dados para a aplicação da técnica com sucesso – ou pelo menos uma estimativa inicial das probabilidade de falha.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação de mestrado abordou um modelo que sistematiza o uso combinado de técnicas de análise de falhas, voltadas ao projeto para confiabilidade. O processo de análise de confiabilidade é importante para assegurar o desempenho do produto em todas as etapas do ciclo de vida e, por esta razão, nos capítulos iniciais buscou-se contextualizar o trabalho, apresentando-se os conceitos relacionados ao projeto de produtos e à análise de confiabilidade.

No Capítulo 1 foi apresentado o contexto do trabalho, visando evidenciar os motivos que levaram ao seu desenvolvimento. Neste capítulo também foram apresentados os objetivos e os resultados esperados.

O Capítulo 2 abordou o processo de projeto de produtos. Desta forma, foram apresentados alguns aspectos gerais de projeto – relacionados principalmente aos desafios existentes na atualidade para que o produto atinja sucesso de mercado –, os quais tornam necessário utilizar metodologias que possibilitem estruturar o processo. Dentro deste contexto, foi apresentada a metodologia de projeto PRODIP, adotado como modelo de referência para tratar o processo de desenvolvimento de produtos, o qual enfatiza a importância em projetar o produto considerando todas as etapas do seu ciclo de vida (planejamento, projeto, implementação, uso e descarte).

A macrofase de projeto do modelo PRODIP é estruturada em quatro fases: projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. Dentro destas fases, a confiabilidade do produto é abordada de maneira distinta, delimitada pelas informações disponíveis – principalmente em relação ao nível de detalhes sobre a concepção do produto. Assim, foi possível evidenciar que a aplicação das técnicas de análise de falha é mais aderente às fases em que existe uma ideia mais concreta sobre o conceito do produto, tais como as fases de projeto preliminar e detalhado. Nas fases iniciais (informacional e conceitual), por sua vez, a confiabilidade é tratada dentro do contexto de requisitos de projeto.

Foram apresentadas ainda as maneiras pelas quais a confiabilidade é tratada em cada etapa do ciclo de vida dentro do modelo apresentado por Calil (2009). A fase de planejamento define as características que delimitam o programa de confiabilidade do produto, influenciando todas as demais, pois nesta fase são definidos aspectos como recursos financeiros, tempo disponível para analisar a confiabilidade, entre outros. Já a fase de projeto deve englobar todas as fases seguintes, pois para melhorar o atributo de confiabilidade do produto deve ser levado em consideração as condições sob as quais este irá

operar, características de fabricação e montagem, etc. Na implementação, a confiabilidade deve ser abordada sob a perspectiva dos processos envolvidos durante esta fase, como por exemplo, a fabricação e montagem. Na fase de uso as técnicas são aplicadas visando garantir a operação do produto, ou seja, voltadas à manutenção e análise de risco. Por fim, na fase de descarte, o produto é analisado sob a visão da análise de risco, pois dependendo das características construtivas, a desmontagem do produto podem levar a danos ao meio ambiente ou pessoas.

Com isso, foi possível estabelecer a maneira como o conjunto de técnicas deve ser aplicado para analisar o sistema técnico. Apesar da proposta ser voltada ao projeto para confiabilidade, a análise de falhas pode ser aplicada em todas as fases do ciclo de vida com objetivos distintos, mas a maneira como as técnicas são aplicadas e combinadas é feita da mesma forma.

Os conceitos que permeiam a análise de confiabilidade foram abordados no Capítulo 3 e, com isso, foi possível delinear o processo de análise e as ações necessárias para sua execução. Conforme o que foi exposto, a confiabilidade é um atributo cada vez mais relevante para competitividade do produto no mercado. Entretanto, a maneira pela qual este atributo é tratado depende de características como: a relação entre a vida útil e a vida econômica (tipo de negócio); do tipo de mercado (consumidor, industrial ou militar / aeroespacial); e do produto propriamente dito. Portanto, torna-se essencial caracterizar detalhadamente o contexto em que o produto está inserido.

Outra questão importante evidenciada no Capítulo 3 é a disponibilidade de dados para a execução da análise. A partir do registro de informações sobre um dado sistema é possível obter uma distribuição de probabilidades que permite estimar a ocorrência de falhas no tempo e então estabelecer ações para gerenciar as falhas. Porém, como normalmente estes dados não estão disponíveis, principalmente durante a fase de projeto, é interessante partir para uma análise qualitativa. Com este tipo de análise é possível modelar o comportamento do sistema – relacionando seus subsistemas, componentes e as falhas –, e então orientar a coleta de dados para uma análise quantitativa.

As técnicas mais utilizadas na análise qualitativa foram apresentadas no Capítulo 4. Ao estudá-las foi possível identificar os benefícios e limitações de cada uma, bem como o procedimento para sua utilização. Foi possível perceber também que, apesar de em muitos casos as técnicas serem utilizadas simultaneamente, a integração pode se tornar um tanto confusa. Assim, este trabalho apresentou uma forma sistemática para a utilização combinada entre as técnicas, no Capítulo 4, bem como um exemplo de aplicação no Capítulo 6.

7.1 RESULTADOS E CONTRIBUIÇÕES

O desenvolvimento deste trabalho trouxe como resultado um modelo para a análise de falhas e confiabilidade que permite a integração de diferentes técnicas consagradas, tendo como base a FMEA, utilizando-se de outras técnicas para auxiliar no levantamento de informações, elicitando do conhecimento e alcançar o nível de detalhes necessário para alcançar os objetivos estabelecidos para a análise.

Como a abordagem da confiabilidade depende do contexto em que o produto está inserido, a primeira tarefa para a utilização das técnicas é a definição do escopo de análise, contribuindo para estabelecer de forma clara algumas questões importantes como: qual o nível de detalhamento desejado, qual a disponibilidade de dados sobre o sistema técnico, em qual fase do ciclo de vida o sistema se encontra, quais fases devem ser consideradas na análise, quais técnicas devem ser utilizadas (de acordo com o nível de detalhamento), etc.

Ao utilizar o modelo proposto para analisar o sistema hidráulico de acionamento (SHA) do leme do navio Itabuna foi possível perceber que a definição clara do escopo permitiu, por exemplo, limitar o levantamento dos efeitos dos modos de falhas identificados até a não movimentação dos cilindros hidráulico ou sua movimentação fora de especificação. No escopo também foi definido que a análise se limitaria apenas ao sistema técnico, ou seja, os processos envolvidos em sua operação e manutenção não foram abordados, caso contrário seria necessário aplicar a técnica IDEF0 para o detalhamento dos processos e identificação de possíveis modos de falha.

Um problema comum, principalmente quando se utiliza a FMEA está relacionada ao tipo de abordagem da técnica: funcional ou estrutural. Conforme foi exposto no Capítulo 4 a existência destes dois tipos de abordagens pode resultar na dificuldade para os analistas em identificar o que se caracteriza como um modo de falha, uma causa ou um efeito. Para contornar este problema, o modelo proposto estabelece a análise sob uma abordagem funcional.

Seguindo esta abordagem, o desdobramento do sistema técnico em subsistemas e componentes, e a identificação de suas funções (de acordo com os passos apresentados na Figura 5.2) trouxe dois benefícios principais, a saber:

- Permite analisar os subsistemas e componentes separadamente para então relacionar as análises e obter um modelo para o sistema global.
- Permite integrar as técnicas para obter resultados de acordo com o nível de detalhamento estabelecido no escopo.

De fato, ao seguir os passos para a definição das funções dos subsistemas e componentes desdobrados do SHA foi possível perceber que os subsistemas identificados (potencia, isolamento e atuação) podem ser facilmente relacionados dentro da análise, pois estabelecendo-se uma relação sequencial entre as funções dos subsistemas, o modo de falha de um dado subsistema atua como causa do modo de falha do subsistema seguinte e assim sucessivamente. Este relacionamento pode ser facilmente observado ao utilizar a técnica CNEA para modelar os modos de falha, causas e efeitos do sistema global. É importante destacar também que analisar separadamente os subsistemas é vantajoso quando se trata de subsistemas complexos, uma vez que reduz a quantidade de informações que devem ser gerenciadas simultaneamente.

A utilização da técnica CNEA para o levantamento das causas, efeitos e barreiras dos modos de falha identificados para as funções do sistema técnico mostrou-se bastante aderente às planilhas de FMEA, o que permitiu a integração entre as duas técnicas de forma direta. Além disso, a CNEA é uma técnica que conta com recursos gráficos para a representação dos eventos modelados, o que facilita o entendimento e elicitación do conhecimento, além de trazer mais detalhes em comparação com as planilhas de FMEA, pois permite relacionar os diferentes eventos dentro da cadeia causal.

O modelo apresentado oferece ainda grande flexibilidade ao analista sobre como detalhar o sistema técnico. A maneira como é feito o relacionamento entre os subsistemas e componentes identificados, por meio de suas funções, permite que o analista decida por detalhar ou não um subsistema – de acordo com critérios como disponibilidade de informações, tempo e recursos para a análise, etc –, sem comprometer a obtenção de um modelo para o sistema global. Nestes casos, pode-se apenas identificar os modos de falha deste subsistema, que atuarão como causas dos modos de falha do subsistema seguinte. Além disso, pode-se optar por utilizar as técnicas FTA e redes bayesianas para detalhar ainda mais uma causa ou obter resultados quantitativos, respectivamente.

Assim, pode-se concluir que os objetivos apresentados para este trabalho no Capítulo 1 foram devidamente alcançados. As principais técnicas de análise de falha presentes na literatura foram estudadas, sendo identificadas suas vantagens e limitações, o que possibilitou estruturar uma forma adequada para seu uso combinado, cujo exemplo de aplicação está apresentado no Capítulo 6. A utilização das técnicas foi sistematizada, permitindo uma maior racionalidade no processo de análise, facilitando o entendimento dos analistas e possibilitando a adequação do modelo aos resultados esperados.

Vale ressaltar ainda que as técnicas selecionadas de fato se complementam e permitem sanar algumas limitações encontradas quando são apli-

cadadas separadamente. A dificuldade de entendimento devido à organização das informações em forma de tabela, encontrada na técnica FMEA, pôde ser solucionada utilizando-se a CNEA para representar os elementos da cadeia causal. Por outro lado, as duas técnicas não permitem a obtenção de dados quantitativos, o que foi solucionado por meio da utilização das técnicas FTA e redes bayesianas. Portanto, pode-se perceber que a utilização do modelo proposto traz benefícios tanto pelo detalhamento do sistema técnico, quanto pela organização do processo de análise e das informações obtidas. Isso permite comparar de maneira mais ágil diferentes configurações do sistema técnico durante o projeto, ou ainda aplicar engenharia reversa; melhorar o conhecimento sobre o sistema técnico, auxiliando o planejamento da manutenção; facilita a capacitação tanto dos projetistas sobre o processo de projeto para confiabilidade, quanto de pessoas envolvidas na operação e manutenção do sistema técnico.

7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- **Aplicar o modelo de análise na fase de projeto do ciclo de vida de um produto:** Apesar deste trabalho ser voltado ao projeto para confiabilidade, devido às limitações de tempo e recursos optou-se por exemplificar a aplicação do modelo em um sistema técnica existente, pois o princípio de utilização das técnicas é o mesmo, porém na fase de projeto a disponibilidade de informações é menor. A aplicação do modelo no SHA poderia ainda ser feita com o objetivo de desenvolver engenharia reversa e identificar maneiras de eliminar a necessidade do subsistema de isolamento, tendo em vista que este subsistema, assim como a redundância do segundo subsistema de potência, foi uma solução encontrada para que o
- **Aplicar o modelo de análise considerando-se os processos:** Dada a complexidade de obtenção de informações, a aplicação do modelo não considerou processos como os envolvidos na operação e manutenção do SHA. Com isso, a técnica IDEF0 não foi utilizada no exemplo de aplicação, apesar de ter sido apresentada.
- **Sistematizar o uso de técnicas que permita a analisar sistemas técnicos seguindo uma abordagem estrutural:** A maneira encontrada para integrar as técnicas de análise apresentadas segue uma abordagem funcional, o que em alguns casos pode trazer dificuldades para os analistas. A opção pela abordagem funcional ocorreu devido a dificuldade em encontrar uma forma de tratar as probabilidades condicionais das redes bayesianas nos casos em que uma causa-raiz, por exemplo, possa

levar a diferentes causas intermediárias ou modos de falha, o que pode se tornar ainda mais complexo se esta causa tiver influência sobre sub-sistemas distintos.

- **Avaliar a possibilidade de relacionar os resultados obtidos para cada condição de operação:** No escopo definido para a análise do SHA foi considerada apenas a condição normal de operação. Deve-se avaliar como ocorre o relacionamento entre os resultados obtidos nas análises tanto na condição normal como na de emergência.
- **Aplicar as redes bayesianas para todos o sistema:** Devido a falta de dados para o cálculo das probabilidades condicionais, foi aplicada apenas uma rede bayesiana em uma ramificação de um diagrama CNEA, a partir de dados estimados, visando exemplificar a utilização da técnica. Seria interessante coletar dados para todo o sistema, em campo ou a partir da consulta de especialistas, permitindo obter valores de probabilidade de falha para o sistema global.
- **Buscar novas técnicas que complementem o modelo de análise:** O modelo apresentada neste trabalho contempla apenas as técnicas IDEF0, FMECA, CNEA, redes bayesianas e FTA. Convém avaliar a possibilidade de inserir novas técnicas no modelo de análise.

REFERÊNCIAS

- ASIMOV, M. **Introduction to design: fundamentals of engineering design**. New Jersey: Prentice Hall, 1962.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade – terminologia**. Rio de Janeiro, 1994. 37 p.
- BACK, N. **Metodologia de projeto de produtos industriais**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.
- BACK, N. et al. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. 1. ed. São Paulo: Editora Manole Ltda., 2008. 601 p.
- BERTSCHE, B. **Reliability in automotive and mechanical engineering**. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 492 p. ISBN 3540339698.
- BIASOTTO, E. **Sistema de governo do navio Itabuna: Estudo de confiabilidade do sistema hidráulico de acionamento do leme**. [S.l.], 2008. Relatório final para Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).
- BILLINTON, R.; ALLAN, R. N. **Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and techniques**. New York: Plenum Press, 1992.
- BLANCHARD, B. S.; FABRYCKY, W. J. **Systems engineering and analysis**. New Jersey: Prentice Hall, 1981.
- BROMBACHER, A. C.; SANDER, P. C.; SONNEMANS, P. J. M.; ROUVROYE, J. L. Managing product reliability in business processes 'under pressure'. **Reliability engineering and system safety**, Elsevier, Northern Ireland, v. 88, p. 137 – 146, 2004.
- CALIL, L. F. P. **Metodologia para análise de risco: foco na segurança e na continuidade**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2009.
- CALIL, L. F. P. et al. CNEA (causal network event analysis): proposta de técnica de análise de risco. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO (CBGDP 2009), São José dos Campos**. [S.l.: s.n.], 2009. Anais ...
- CROWE, D. et al. **Design for reliability**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2001. 220 p.

DHILLON, B. S. **Reliability, quality, and safety for engineers**. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 2005. ISBN 0-8493-3068-8.

DIAS, A. **Projeto para a confiabilidade e manutenibilidade**: Notas de aula. 2008. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2008.

DIAS, A. et al. **Metodologia para análise de risco**: Mitigação de perda de SF_6 em disjuntores. 1. ed. Florianópolis, SC: Nova Letra Gráfica & Editora, 2011. 1304 p. ISBN: 978-85-98128-42-9.

ERICSON II, C. A. **Hazard analysis techniques for system safety**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

JENSEN, F. V.; NIELSEN, T. D. **Bayesian Networks and Decision Graphs**. New York: Springer, 2007.

JURAN, J. M. **A qualidade desde o projeto**: Novos passos para o planejamento da qualidade em produtos e serviços. 3^a. ed. São paulo: Pioneira, 1997. Tradução por Jr, Nivaldo Montingelli.

JURAN, J. M.; GODFREY, A. B. **Juran's Quality Handbook**. 5^a. ed. New York: MacGraw-Hill, 1998.

KIMURA, F.; MATOBA, Y.; MITSUI, K. Designing product reliability based on total product lifecycle modelling. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Elsevier, Northern Ireland, v. 56, p. 163 – 166, 2007.

KUMAMOTO, H.; HENLEY, E. J. **Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientist**. 2^a. ed. New York: IEEE Press Marketing, 1996. ISBN 0780310047.

KUO, T.; HUANG, S. H.; ZHANG, H. Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications and perspectives. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 41, p. 241 – 260, 2001.

LEVIN, M. M.; KALAL, T. T. **Improving product reliability**: strategies and implementation. West Sussex: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

MURTHY, D. N. P.; RAUSAND, M.; VIRTANEN, S. Investment in new product reliability. **Reliability engineering and system safety**, Elsevier, Northern Ireland, v. 94, p. 1593 – 1600, 2009.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). **Reliability Centered Maintenance Guide**: For Facilities and Collateral Equipment . Washington, 2008.

NIST (National Institute of Standards and Technology). **FIPS PUBS 183**: Integration definition for function modeling (IDEF0). Gaithersburg, MD, 1993. Draft Federal Information Processing Standards Publication.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Konstruktionslehre**. Berlin: Springer Verlag, 1977.

PEARL, J. **Probabilistic reasoning in intelligent systems**: networks of plausible inference. revised second printing. San Mateo, USA: MorganKaufmann Publishers Inc., 1988.

PRESLEY, A. R. **A representation method to support enterprise engineering**. Tese (Doctor of Philosophy) — Faculty of the Graduate School of University of Texas at Arlington, Arlington, 1997.

SAE (Society of Automotive Engineers). **JA1011**: Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes. Warrendale, PA, 1999.

SAKURADA, E. Y. **As técnicas de análise dos modos de falhas e seus efeitos e análise de árvore de falhas no desenvolvimento e na avaliação do produto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2001.

SANTOS, M. Q. C. **Sistematização para aplicar o projeto de experimentos na melhoria da confiabilidade de produtos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2001.

SINTEF INDUSTRIAL MANAGEMENT. **OREDA**: Offshore reliability data. 4th. ed. Trondheim, 2002.

STAMATIS, D. H. **Failure mode and effects analysis**: FMEA from theory to execution. 7. ed. Milwaukee: ASQC Quality Press, 1995.

UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina). NEDIP (Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos). **Análise de operação e manutenção de frota de ônibus para redução do consumo de diesel em empresas de transporte coletivo**. Revisão 1. Florianópolis, 2007. Relatório de projeto.

ULLMAN, D. G. **The mechanical design process**. New York: McGraw-Hill, 1992.

USA (United States of America). DOD (Department of Defense). **MIL-STD-721C**: Definitions of terms for reliability and maintainability. Washington, 1981.

WEUSTINK, I. et al. A generic framework for cost estimation and cost control in product design. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, Northern Ireland, v. 103, p. 141 – 148, 2000.

YANG, G. **Life Cycle Reliability Engineering**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. 517 p.