

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Samanta de Oliveira Guzzon

**PROPOSTA DE ANÁLISE QUANTITATIVA DE  
CONFIABILIDADE A PARTIR DE DADOS  
QUALITATIVOS PROVENIENTES DA FMEA**

Porto Alegre

2009

Samanta de Oliveira Guzzon

**Proposta de análise quantitativa de confiabilidade a partir de dados qualitativos  
provenientes da FMEA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas da Qualidade.

Orientador: José Luis Duarte Ribeiro, Dr.

Porto Alegre

2009

Samanta de Oliveira Guzzon

**Proposta de análise quantitativa de confiabilidade a partir de dados qualitativos  
provenientes da FMEA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

**Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.**

Orientador PPGEP/UFRGS

---

**Prof. Flávio Sanson Fogliatto, *Ph.D.***

Coordenador PPGEP/UFRGS

**Banca Examinadora:**

Professora Márcia Elisa Soares Echeveste, Dra. (PPGEP/UFRGS)

Professor Eduardo Andre Perondi, Dr. (PROMEC/UFRGS)

Morgana Pizzolato, Dra. (FEEng/UFRGS)

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, José Luis Duarte Ribeiro, pelo conhecimento transmitido e dedicação dispensada.

Aos professores da banca examinadora pela disponibilidade e contribuições dadas ao trabalho.

Aos colegas do LOPP, em especial aos amigos Mariela, Danilo e Guido, pelos momentos de descontração.

Às minhas amigas, que entenderam a minha falta de tempo e estiveram sempre ao meu lado, apoiando-me.

À minha família, em especial aos meus pais e à minha irmã, pelo amor, incentivo, compreensão e paciência.

Enfim, OBRIGADA A TODOS que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um método de análise de confiabilidade de sistemas novos em desenvolvimento, no qual se utiliza como referência dados predominantemente qualitativos. O método proposto está organizado em três fases, as quais são subdivididas em etapas que constituem as atividades a serem realizadas. A primeira fase é a análise FMEA, que visa definir e identificar falhas potenciais do sistema ainda em seus estágios iniciais de conceituação e projeto. A segunda fase é a análise de confiabilidade, que tem como objetivo gerar dados quantitativos para uma análise aprimorada da confiabilidade do sistema a partir de dados qualitativos coletados na fase da análise FMEA. A terceira fase consiste na análise comparativa e visa, além de comparar os resultados obtidos previamente, propor uma forma de integração destes. O método proposto foi aplicado em dois sistemas principais de um sistema de transporte sobre trilhos: o sistema de propulsão e o sistema de controle. Com o intuito de integrar as duas técnicas, propôs-se uma nova forma de calcular o risco, denominado RPNI, que leva em consideração o índice de severidade, a probabilidade de ocorrência, a probabilidade de detecção e o índice de impacto. A partir desse valor, foi então possível determinar os componentes considerados prioritários para os sistemas e propor as medidas cabíveis, tendo em vista as metas de segurança e a confiabilidade do sistema em desenvolvimento.

Palavras-chave: Confiabilidade, FMEA (Análise dos Modos e Efeitos de Falha), desenvolvimento de produto.

## **ABSTRACT**

This work presents a method for the reliability analysis of a new system under development, which uses qualitative data as predominant reference. The proposed method is organized in three phases, which are subdivided in activities to be accomplished. The first phase employs the FMEA to define and identify potential failures in the early stages of conceptualization and system design. The second phase contemplates a mathematical reliability analysis, providing quantitative data for an enhanced analysis of system reliability from qualitative data collected at the first phase. The third phase, named comparative analysis, compares the previous results and proposes an integrated prioritization. The proposed method was applied in two major systems of a transportation system on guideways: the propulsion and the control systems. In order to integrate the FMEA and the mathematical analysis, a different form to calculate the risk, named RPNI, was proposed, which considers the severity index, occurrence probability, detection probability and the impact index. Using the RPNI, it was possible to determine system priority components and to propose appropriate measures to increase the safety and reliability goals of the system under development.

**Keywords:** Reliability, FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), Product Reliability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva da banheira .....	23
Figura 2: Composição da curva da banheira .....	23
Figura 3: Função densidade de falha $f(t)$ .....	25
Figura 4: Função Acumulada de falha $F(t)$ .....	26
Figura 5: Função Confiabilidade $R(t)$ .....	26
Figura 6: Relações entre as funções $F(t)$ , $f(t)$ , $R(t)$ e $h(t)$ .....	27
Figura 7: Representação gráfica e matemática da distribuição normal .....	28
Figura 8: Representação gráfica e matemática da distribuição exponencial.....	29
Figura 9: Representação gráfica e matemática da distribuição lognormal .....	30
Figura 10: Relação entre $\beta$ e as regiões da curva da banheira.....	31
Figura 11: Representação gráfica e matemática da distribuição de Weibull .....	32
Figura 12: Efeito do parâmetro de forma na distribuição de Weibull .....	33
Figura 13: Efeito do parâmetro de escala na distribuição de Weibull .....	34
Figura 14: Efeito do parâmetro de localização na distribuição de Weibull .....	34
Figura 15: Tipos de conexões em sistemas: a) série, b) paralelo, c) série-paralelo e d) paralelo-série .....	37
Figura 16: Redundância .....	39
Figura 17: Efeito na confiabilidade e taxa de falha conforme quantidade de itens redundantes no sistema .....	40
Figura 18: Efeito na confiabilidade e taxa de falha conforme tipo de redundância empregada .....	41
Figura 19: Diferença entre falha e erro .....	42
Figura 20: Dependência entre defeito, falha e erro.....	43
Figura 21: Classificação das falhas.....	44
Figura 22: Procedimento geral de FMEA .....	47
Figura 23: Formulário FMEA .....	47
Figura 24: Origem e utilização dos itens críticos .....	48
Figura 25: Classificação das funções.....	50
Figura 26: Classificação dos modos de falha .....	52
Figura 27: Níveis de severidade do risco .....	54
Figura 28: Classificação das causas de falha.....	55
Figura 29: Classificação temporal dos métodos no PDP .....	60

Figura 30: Interfaces e Intersecções da FMEA com outros métodos qualitativos e quantitativos.....	61
Figura 31: Fases e etapas da metodologia proposta.....	65
Figura 32: Cabeçalho do formulário FMEA .....	66
Figura 33: Veículo .....	73
Figura 34: Sistema de propulsão .....	73
Figura 35: Árvore funcional do sistema Aeromovel .....	75
Figura 36: Descrição dos principais componentes do sistema de propulsão do Aeromovel ...	76
Figura 37: Descrição dos principais componentes do sistema de controle do Aeromovel.....	77
Figura 38: Croqui do sistema de controle e de propulsão do Aeromovel.....	78
Figura 39: Diagrama de blocos dos sistemas de propulsão e de controle do Aeromovel.....	79
Figura 40: Componentes críticos dos sistemas de controle e de propulsão pela análise FMEA .....	84
Figura 41: Curvas típicas da distribuição de Weibull para três tipos de falhas.....	88
Figura 42: Confiabilidade do sistema ao longo de um dia de operação .....	90
Figura 43: Confiabilidade do sistema ao longo do tempo (viagens) .....	91
Figura 44: Distribuição acumulada de falhas do sistema ao longo do tempo (viagens).....	91
Figura 45: Densidade de probabilidade de falhas do sistema ao longo do tempo (viagens) ...	91
Figura 46: Taxa de falhas do sistema ao longo do tempo (viagens).....	92
Figura 47: Componentes críticos dos sistemas de controle e de propulsão pela análise de confiabilidade.....	92
Figura 48: Propostas de melhorias para o sistema Aeromovel .....	96
Figura 49: Diagrama de blocos do sistema Aeromovel modificado.....	97
Figura 50: Confiabilidade do sistema modificado ao longo de um dia de operação.....	98
Figura 51: Confiabilidade do sistema modificado ao longo do tempo (viagens).....	98
Figura 52: Distribuição acumulada de falhas do sistema modificado ao longo do tempo (viagens) .....	99
Figura 53: Densidade de probabilidade de falhas do sistema modificado ao longo do tempo (viagens) .....	99
Figura 54: Taxa de falhas do sistema modificado ao longo do tempo (viagens) .....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros para determinação do índice de severidade .....	54
Tabela 2: Parâmetros para determinação do índice de ocorrência .....	56
Tabela 3: Parâmetros para determinação do índice de detecção .....	57
Tabela 4: Exemplos de modo de falha .....	80
Tabela 5: Exemplos de efeitos da falha e índice de severidade .....	81
Tabela 6: Exemplos de causas de falha e índice de ocorrência.....	81
Tabela 7: Exemplos de controles atuais e índice de detecção.....	82
Tabela 8: Exemplos de cálculo do RPN.....	83
Tabela 9: Exemplo de determinação de taxa de falha e MTBF .....	85
Tabela 10: Parâmetros de forma dos componentes .....	86
Tabela 11: Exemplo de parâmetros de alguns componentes.....	89
Tabela 12: Exemplo de confiabilidade de alguns componentes.....	90
Tabela 13: Componentes críticos dos sistemas de controle e de propulsão.....	94

# SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>9</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 Comentários iniciais.....	13
1.2 Tema e Objetivos.....	14
1.3 Justificativa.....	15
1.4 Método .....	16
1.5 Delimitações do trabalho.....	18
1.6 Estrutura do trabalho.....	18
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>20</b>
2.1 Evolução histórica da confiabilidade.....	20
2.2 Conceitos básicos associados à confiabilidade.....	21
2.2.1 Sistemas reparáveis e não reparáveis.....	21
2.2.2 Principais funções utilizadas em estudos de confiabilidade .....	22
2.2.2.1 <i>Função de risco ou taxa de falha</i> .....	22
2.2.2.2 <i>Função densidade de falha e função acumulada de falha</i> .....	25
2.2.2.3 <i>Função de confiabilidade</i> .....	26
2.2.2.4 <i>Relação entre as funções</i> .....	27
2.3 Distribuições de probabilidade associadas à confiabilidade .....	27
2.3.1 Distribuição normal .....	28
2.3.2 Distribuição exponencial.....	28
2.3.3 Distribuição lognormal .....	29
2.3.4 Distribuição de Weibull .....	30
2.4 Parâmetros das distribuições de probabilidade.....	32
2.4.1 Parâmetro de forma.....	32
2.4.2 Parâmetro de escala .....	33
2.4.3 Parâmetro de localização .....	34
2.5 Métodos de estimação dos parâmetros das distribuições.....	35
2.5.1 Método dos momentos.....	35
2.5.2 Método da máxima verossimilhança .....	35
2.5.3 Método dos mínimos quadrados.....	36
2.6 Confiabilidade de sistemas.....	36
2.7 Falhas .....	42
2.8 Análise dos Efeitos e Modos de Falha (FMEA).....	44
2.8.1 Função.....	49

2.8.2	Modo de Falha .....	51
2.8.3	Efeito de Falha .....	53
2.8.4	Causa de Falha .....	54
2.8.5	Métodos de Detecção de Falha .....	56
2.8.6	Avaliação de Risco .....	57
2.9	Aplicações de FMEA .....	60
<b>3</b>	<b>MÉTODO PROPOSTO .....</b>	<b>64</b>
3.1	Análise FMEA .....	65
3.1.1	Conhecimento do produto .....	66
3.1.2	Determinação dos modos potenciais de falha .....	67
3.1.3	Verificação dos efeitos de cada falha e do índice de severidade .....	67
3.1.4	Determinação das causas de cada falha e do índice de ocorrência .....	67
3.1.5	Definição dos controles do processo atual e do grau de detecção de cada falha 68	
3.1.6	Cálculo do RPN .....	68
3.1.7	Identificação dos componentes críticos .....	68
3.2	Análise de Confiabilidade .....	68
3.2.1	Determinação das taxas de falhas .....	69
3.2.2	Definição das distribuições de probabilidade .....	69
3.2.3	Determinação dos parâmetros das distribuições .....	69
3.2.4	Cálculo da confiabilidade de cada componente .....	70
3.2.5	Cálculo da confiabilidade total do sistema .....	70
3.2.6	Identificação dos componentes críticos .....	70
3.3	Análise comparativa .....	71
3.3.1	Análise dos resultados .....	71
3.3.2	Proposta de melhoria .....	71
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO PRÁTICA .....</b>	<b>72</b>
4.1	Análise FMEA .....	72
4.1.1	Conhecimento do produto .....	72
4.1.2	Determinação dos modos potenciais de falha .....	80
4.1.3	Verificação dos efeitos de cada falha e do índice de severidade .....	80
4.1.4	Determinação das causas de cada falha e do índice de ocorrência .....	81
4.1.5	Definição dos controles do processo atual e do grau de detecção de cada falha 82	
4.1.6	Cálculo do RPN .....	82
4.1.7	Identificação dos componentes críticos .....	83
4.2	Análise de Confiabilidade .....	84
4.2.1	Determinação das taxas de falhas .....	84
4.2.2	Definição das distribuições de probabilidade de falha .....	85
4.2.3	Determinação dos parâmetros das distribuições .....	86
4.2.4	Cálculo da confiabilidade de cada componente .....	89
4.2.5	Cálculo da confiabilidade total do sistema .....	90
4.2.6	Identificação dos componentes críticos .....	92
4.3	Análise comparativa .....	93
4.3.1	Análise dos resultados .....	93
4.3.2	Proposta de melhoria .....	94

<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>100</b>
5.1 Conclusões.....	100
5.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	101
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>108</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>116</b>
<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>118</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Comentários iniciais

Em meados do século passado, entendia-se que projetar um equipamento confiável significava selecionar corretamente os componentes e empregá-los conforme recomendações do fabricante. Além disso, era comum conduzir o projeto de um produto ou sistema sem considerar as diversas variáveis existentes, protegendo-se de eventuais falhas através da utilização de coeficientes de segurança. Por não possuírem valores bem definidos, a utilização desses coeficientes pode superestimar ou subestimar os aspectos que afetam a segurança do produto ou sistema. Procedimentos estatísticos, por admitirem a possibilidade de ocorrência de falhas, são mais adequados para definir com maior precisão a margem de segurança a ser utilizada (LAFRAIA, 2001).

Isso porque a falha é um conceito fundamental em qualquer análise de confiabilidade, sendo definida como a falta de habilidade de um item executar uma função requerida ou esperada. A fim de assegurar que o produto ou sistema apresente o nível de desempenho desejado, sem apresentar falhas, os engenheiros utilizam tempo e recursos significativos durante as fases de projeto e de produção de um item, aumentando assim sua confiabilidade (ELSAYED, 1996; RAUSAND; OIEN, 1996).

De maneira geral, sistemas que podem afetar diretamente a vida de um grande número de pessoas estão cada vez mais presentes na sociedade. Com o aumento da sofisticação e da severidade das conseqüências das falhas dos sistemas, passou-se a empregar técnicas mais sofisticadas de predição de confiabilidade de um sistema, que podem ser empregadas ainda em suas fases iniciais de projeto. Em muitos casos, a qualidade desses sistemas está sujeita a uma série de exigências legais que especificam padrões mínimos de confiabilidade. Assim, melhorar a confiabilidade de um sistema ou produto é um dos aspectos importantes de um programa de melhoria da qualidade (BORGES; COLOSIMO; FREITAS, 1996; LAFRAIA, 2001).

A confiabilidade de um item é, portanto, uma das medidas mais importantes de desempenho deste. A confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de que este item desempenhe a função requerida, sem falhas, por um intervalo de tempo estabelecido, sob condições definidas de uso. A fim de aumentar a confiabilidade em sistemas ainda em fase de planejamento, tem-se a opção de elaborar seu projeto baseado na confiabilidade. A utilização

de técnicas como a análise da árvore de falhas (FTA – *fault tree analysis*), a análise de modos e efeito de falhas (FMEA – *failure modes and effects analysis*) e testes acelerados de vida permitem a identificação dos equipamentos e processos de maior risco antes mesmo do início da operação. O uso integrado dessas técnicas também vem a ser uma possibilidade. Com isso, torna-se possível eliminar ou minimizar todos os modos de falha catastróficos ou críticos ou, ainda, estabelecer previamente um sistema de priorização na manutenção a um custo mínimo (LAFRAIA, 2001; SIQUEIRA, 2005).

Tanto a FMEA como a FTA são técnicas de análise de falhas que fornecem pistas para melhorias nos sistemas, mediante a descoberta de pontos problemáticos, relacionando as falhas nos componentes do subsistema com suas conseqüências no sistema como um todo. A análise de falhas pode ser realizada tanto do sistema completo até seu componente mais simples (FTA), como do nível mais elementar até o nível hierárquico superior do sistema (FMEA) (HELMAN; ANDERY, 1995).

A análise de confiabilidade deve começar no início do projeto e prosseguir durante as fases de desenvolvimento e de operação e deve ser atualizada sempre que necessário. Essa última etapa disponibiliza dados quantitativos do processo, tornando a análise de confiabilidade um processo dinâmico. O que se espera, afinal, é a obtenção do menor número de falhas possíveis no sistema ou produto e, se estas ocorrerem, que a extensão de sua gravidade seja a mínima possível.

## 1.2 Tema e Objetivos

O presente trabalho tem como tema a confiabilidade de sistemas em novas aplicações, onde há incertezas referentes a taxas de falha de componentes e técnicas qualitativas precisam ser usadas.

O objetivo geral do trabalho é desenvolver uma proposta de uso da FMEA como base para uma análise de confiabilidade quantitativa. Isso irá permitir transformar os índices da FMEA em parâmetros das distribuições de probabilidade dos componentes envolvidos, permitindo o cálculo da confiabilidade global do sistema. A motivação para o trabalho surgiu da necessidade de estudar a confiabilidade do sistema de controle e do sistema de propulsão de um sistema automatizado de transporte de passageiros. Historicamente, sabe-se que é mais fácil justificar sobre a necessidade de maiores investimentos em um projeto quando se consegue visualizar o benefício que estes irão gerar. O benefício, nesse caso, é o incremento

de confiabilidade no sistema. Uma análise FMEA fornece apenas dados qualitativos, não podendo ser feita tal comparação. Contudo, ao combinar a FMEA com uma técnica quantitativa, tal comparação torna-se possível.

Nesse contexto, pretende-se identificar os principais modos de falha desses sistemas, quantificar sua gravidade, ocorrência e probabilidade de detecção, além de utilizar essas informações para o cálculo da confiabilidade geral do sistema, propondo medidas que minimizem a probabilidade ou bloqueiem a ocorrência de falhas.

### 1.3 Justificativa

A análise de confiabilidade de um componente ou de um sistema normalmente é realizada quando se tem à disposição dados que permitem estimar os parâmetros das distribuições de probabilidade utilizadas no estudo. Tais dados são obtidos, por exemplo, através de ensaios acelerados de vida, de testes de desempenho em campo, da utilização da garantia. Nesse sentido, diversos autores já realizaram estudos a fim de demonstrar a aplicabilidade dessas técnicas, como, por exemplo, Nelson (2005<sup>a,b</sup>) e Chukova, Arnold e Wang (2004) em testes acelerados de vida e em produtos em garantia, respectivamente.

Existem casos, entretanto, em que tais dados podem não estar disponíveis. Isso ocorre principalmente em desenvolvimento de novas tecnologias, produtos e sistemas. É nesse contexto que o presente trabalho se enquadra e se justifica.

Apesar de alguns autores já terem abordado o uso combinado de técnicas qualitativas e quantitativas, tais como Foss e Ellefsen (2002) e Weinholtz, Kacer e Rochlin (1995), pouco ainda se falou sobre a possibilidade de utilização seqüencial dessas técnicas em sistemas novos ou sujeitos a novas aplicações em estudos de confiabilidade. Neste caso, usualmente os estudos iniciam-se quando o projeto ainda está em desenvolvimento, onde muitos dados são qualitativos e, por vezes, imprecisos.

Tanto os métodos qualitativos como os quantitativos apresentam vantagens e desvantagens. Ao combinar o seu uso, as desvantagens de um método são minimizadas pelas vantagens do outro. Os métodos qualitativos de pesquisa, como a FMEA, trazem como contribuição ao trabalho uma mistura de procedimentos de cunho racional e intuitivo capazes de contribuir para a melhor compreensão dos fenômenos. Seus resultados, porém, podem, muitas vezes, ser difíceis de interpretar e analisar. A utilização de uma técnica quantitativa, nesse momento, pode trazer como benefício, entre outros, a facilitação da análise de tais

resultados. Esse é apenas um exemplo que mostra que combinar técnicas qualitativas e quantitativas pode tornar a pesquisa mais forte e reduzir os problemas de adoção exclusiva de apenas um desses grupos. A combinação pode ser simultânea (utilização das técnicas ao mesmo tempo) ou seqüenciada, na qual os resultados de um método servem de base para o planejamento do emprego do outro método que o segue (NEVES, 1996).

O problema prático que motivou esta dissertação envolve um sistema ainda em desenvolvimento, onde muitas informações referentes à confiabilidade dos componentes são apenas qualitativas. Esse sistema em questão consiste em um sistema automatizado de transporte de passageiros, que utiliza propulsão pneumática. Ele é constituído por diversos componentes, onde se destacam os do sistema propulsor e do sistema de controle. A falha do sistema propulsor ou do sistema de controle acarreta na parada do veículo ou em sua operação inadequada, podendo ocasionar um acidente com conseqüências mais graves.

O sistema propulsor, composto de ventiladores usualmente posicionados próximos às estações de embarque e comandado da estação ou do centro de controle, é responsável pela movimentação do veículo na via. Como a falha do sistema propulsor acarreta a parada do veículo ou em sua operação inadequada, justifica-se a realização da análise de confiabilidade nesse sistema. Dependendo do caso, uma falha nesse sistema pode fazer, inclusive, com que o veículo se movimente na direção contrária, o que poderia ocasionar um acidente com conseqüências mais graves. Portanto, tal análise é essencial para o bom funcionamento do sistema, em particular no que diz respeito à identificação de suas potenciais falhas e riscos associados aos usuários.

O sistema de controle tem sua parte ativa localizada fora do veículo, o que torna este último passivo e comandável à distância. Por permitir a operação remota do veículo, a análise da confiabilidade desse sistema torna-se essencial. Como o veículo não é operado localmente, o sistema de controle deve garantir o desempenho adequado de suas funções principais sem contar com a redundância de um controle local.

#### 1.4 Método

Foi considerada como a forma mais apropriada para esse trabalho a pesquisa na modalidade de pesquisa ação, por ser capaz de proporcionar a manifestação do coletivo da equipe envolvida no estudo. A pesquisa ação é um método que estabelece uma estrutura coletiva, participativa e ativa através do envolvimento das pessoas no problema investigado.

Segundo Engel (2000), uma das características deste tipo de pesquisa é tornar possível intervir na prática de modo inovador já no decorrer do próprio processo de pesquisa e não apenas como possível consequência de uma recomendação na etapa final do projeto.

Do ponto de vista da abordagem, optou-se pelo uso seqüencial de uma pesquisa qualitativa com uma quantitativa. O uso combinado de técnicas qualitativas e quantitativas tem sido muito defendido por diversos autores, visto que tende a fortalecer os resultados obtidos. Günther (2006), por exemplo, defende que o pesquisador não deveria escolher entre uma abordagem ou outra, mas utilizá-las à medida e no momento em que se adequem à sua questão de pesquisa. Weinholtz, Kacer e Rochlin (1995), através de dois estudos de caso, ilustraram o quão ambíguo e enganoso pode se tornar os resultados de estudos quantitativos quando não complementados com dados qualitativos. Foss e Ellefsen (2002), por sua vez, reconheceram que os resultados obtidos através de estudos qualitativos e quantitativos, apesar de serem diferentes, são igualmente importantes e ricos em informações, possibilitando uma descrição mais adequada do problema sob investigação.

A pesquisa qualitativa tem como característica o fato de, usualmente, ser direcionada e detalhada ao longo de seu desenvolvimento, além de não procurar enumerar ou medir eventos e, geralmente, não empregar instrumental estatístico para a análise dos dados. Através desse tipo de pesquisa, obtêm-se dados descritivos mediante contato direto e interativo do pesquisador com a situação que é objeto de estudo (NEVES, 1996).

A pesquisa quantitativa, por sua vez, permite a mensuração dos dados por meio de uma amostra representativa, possibilitando, inclusive, uma generalização dos resultados. Tais resultados possibilitam ainda uma análise das relações causais entre as variáveis através do emprego de modelos matemáticos. Nesse tipo de pesquisa, dificilmente se escuta o participante após a coleta de dados (GÜNTHER, 2006; HAYATI; KARAMI; SLEE, 2006; NEVES, 1996).

O trabalho está organizado em quatro etapas. Na primeira etapa, é realizado um levantamento na literatura sobre os principais conceitos associados à confiabilidade e sobre a técnica FMEA. A segunda etapa consiste na construção teórica da proposta, determinando o procedimento para o estudo da confiabilidade a partir dos resultados obtidos com a técnica FMEA. Em seguida, é mostrada a aplicação do procedimento proposto, envolvendo o uso da técnica de FMEA e posterior análise quantitativa da confiabilidade em um sistema em desenvolvimento. O estudo é baseado na análise de confiabilidade dos sistemas de controle e de propulsão de um sistema automatizado de transporte de passageiros que, por ser um

sistema ainda em desenvolvimento, possui muitas informações imprecisas, por falta de conhecimento prévio referente a alguns componentes, materiais ou procedimentos. Nessa etapa, são esgotados os modos, causas e efeitos das falhas nesses sistemas, bem como é realizada uma avaliação do risco existente em cada caso.

Na quarta etapa é apresentada a análise dos resultados obtidos com o uso do procedimento proposto. Com isso, obtêm-se estimativas de confiabilidade do sistema em estudo, sendo possível a proposição de medidas que minimizem a probabilidade ou bloqueiem a ocorrência de falhas (plano de melhoria dos sistemas).

### **1.5 Delimitações do trabalho**

Uma das limitações da pesquisa está associada aos dados predominantemente qualitativos a qual todo o estudo está baseado. Tais dados podem disponibilizar ordem de grandeza e prioridade para as ações, mas não fornecem estimativas precisas de confiabilidade.

Outra limitação do estudo de confiabilidade diz respeito à impossibilidade de realização de testes físicos nos componentes no momento de realização do estudo, limitando o procedimento proposto ao uso de técnicas qualitativas, baseadas na opinião de especialistas e dados técnicos fornecidos por fabricantes de componentes.

Além disso, é realizada uma validação parcial do procedimento proposto, tendo em vista que tal procedimento foi testado em apenas dois sistemas: o de controle e o de propulsão de um sistema automatizado de transporte de passageiros.

Por fim, ressalta-se que esta dissertação foi desenvolvida a partir do desenho preliminar do sistema (usualmente designado no projeto conceitual). Para análise de FMEA e confiabilidade foram utilizados os dados fornecidos do projeto dos sistemas de propulsão e de controle até o momento de execução. Assim, na medida em que o projeto for evoluindo, poderão surgir alterações e maiores detalhamentos nessas análises.

### **1.6 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos. Inicialmente apresenta-se uma introdução, que inclui comentários iniciais, tema e objetivo do trabalho, assim como a justificativa desses. Apresenta ainda as limitações do estudo e a metodologia utilizada.

O segundo capítulo apresenta uma revisão teórica sobre o tema abordado na dissertação. Inicialmente apresenta os tópicos básicos sobre confiabilidade e análise de falhas necessários à compreensão do trabalho, o que engloba desde a evolução histórica da confiabilidade, até seu conceito e principais funções e distribuições utilizadas. Há ainda uma explanação sobre a confiabilidade de sistemas e os tipos de redundâncias existentes. Após, encontra-se maiores explicações sobre a técnica a ser utilizada para análise de confiabilidade: a FMEA. Por fim, são apresentadas aplicações de FMEA.

A proposta metodológica está presente no terceiro capítulo, no qual é apresentado o desenvolvimento do procedimento para o estudo quantitativo da confiabilidade através do uso de dados qualitativos provenientes da análise FMEA.

No capítulo seguinte, é apresentada a aplicação do procedimento proposto nos sistemas de propulsão e de controle de um sistema automatizado de transporte de passageiros, finalizando pela comparação dos resultados obtidos (itens críticos) com a FMEA e com a análise de confiabilidade quantitativa. Apresenta ainda estimativa da confiabilidade do sistema em estudo e proposição de medidas que minimizem a probabilidade ou bloqueiem a ocorrência de falhas.

No último capítulo, são apresentadas as principais conclusões do trabalho com as devidas considerações. No final do trabalho encontram-se os Apêndices, os quais apresentam as tabelas completas elaboradas durante aplicação do procedimento proposto, tais como a tabela FMEA, a tabela de componentes críticos do sistema e a tabela de taxa de falha, MTBF e demais parâmetros de confiabilidade dos componentes do sistema.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo tem como objetivo realizar uma breve introdução sobre a teoria da confiabilidade e uma de suas principais ferramentas de análise: a FMEA. A fim de dar suporte ao entendimento dessa ferramenta, inicia-se com a evolução histórica e os conceitos básicos de confiabilidade, as principais distribuições de probabilidade associadas à confiabilidade e seus parâmetros. Continua-se com uma breve introdução sobre a confiabilidade de sistemas e os tipos de redundância existentes, além do conceito de falha. Em seguida, realiza-se uma explanação mais aprofundada sobre FMEA, o que inclui as definições de função, modo de falha, efeito de falha, causa de falha, métodos de detecção e avaliação de risco. Por fim, são demonstrados alguns campos onde essa ferramenta pode ser aplicada.

### 2.1 Evolução histórica da confiabilidade

Segundo Lafraia (2001), a confiabilidade de um item é a probabilidade de que este desempenhe a função requerida, por um intervalo de tempo estabelecido, sob condições definidas de uso. A confiabilidade está geralmente ligada com as falhas durante a vida do produto sendo, portanto, um aspecto da incerteza da engenharia.

O conceito de confiabilidade começou a ser utilizado no desenvolvimento de projetos de engenharia durante a segunda guerra mundial, principalmente devido ao desenvolvimento de armamentos de maior complexidade. Na década de 50, houve uma crescente preocupação quanto à confiabilidade dos componentes, essencialmente naqueles presentes em equipamentos eletrônicos. Nesse período, chegou-se a conclusão de que era necessário melhorar a coleta de dados de falha em campo, desenvolver componentes mais confiáveis, estabelecer os requisitos quantitativos de confiabilidade, realizar testes antes de se iniciar uma produção e estabelecer um comitê permanente para estabelecer os padrões de confiabilidade a serem seguidos. Várias pesquisas nessa área foram então realizadas, o que levou ao estabelecimento de programas de confiabilidade, realização de simpósios, desenvolvimento de técnicas estatísticas (como, por exemplo, a distribuição Weibull) e de manuais militares americanos (DENSON, 1998).

No final da década de 50 e início dos anos 60, foram desenvolvidas e aprimoradas técnicas para a predição da confiabilidade através de análises quantitativas. Em 1961, foi desenvolvida a confiabilidade física pela RADC (*Rome Air Development Center*), que visava

analisar o mecanismo de falhas através do estudo das propriedades físicas desencadeadoras de falhas. No ano seguinte, um simpósio nessa área foi realizado pela primeira vez, em Chicago, o qual, anos mais tarde, passou a ser reconhecido internacionalmente (DENSON, 1998; EBEL, 1998).

No início dos anos 70, as indústrias tornaram-se cientes da importância de identificar perigos e quantificar as conseqüências das falhas antes de sua ocorrência. Isto aconteceu devido ao aumento da sofisticação e da severidade das conseqüências das falhas dos sistemas que poderiam afetar diretamente a vida de um grande número de pessoas. Assim, a prática de acertar a partir dos erros observados passou a ser inaceitável. Por volta da metade dos anos 70, após grandes incidentes que levaram a morte de muitas pessoas, houve um aumento do interesse em regular as atividades que poderiam conduzir a incidentes, principalmente as que afetavam a saúde e a segurança do público em geral, atividades estas que até então não possuíam controles formais. Hoje em dia, a segurança tornou-se uma questão crítica, pois a cada ano um número muito grande de pessoas morre ou fica gravemente ferida devido a acidentes (DHILLON, 2005; SMITH, 2001).

## 2.2 Conceitos básicos associados à confiabilidade

### 2.2.1 *Sistemas reparáveis e não reparáveis*

Os sistemas podem ser reparáveis ou não reparáveis. Quando se trata de sistemas não reparáveis, utiliza-se o termo tempo médio até falhas (MTTF – *Mean Time to Failure*) e, de sistemas reparáveis, utiliza-se o termo tempo médio entre falhas (MTBF – *Mean Time Between Failure*). Ambos os termos correspondem ao inverso da taxa de falhas quando esta é constante. Esses tempos médios dão uma idéia de tempos de funcionamento de um sistema até sua falha (CROWE; FEINBERG, 2001).

Sistemas reparáveis são aqueles onde, após a ocorrência de uma falha, a operação pode ser restabelecida satisfatoriamente por alguma ação, incluindo substituição de peças ou ajustes. Nesse tipo de sistema, dois tipos de distribuição são considerados conjuntamente: a de falha e a de reparo. A primeira descreve o tempo para a ocorrência de uma falha de um componente, enquanto a segunda descreve o tempo que leva para efetivamente reparar o componente. A partir dessas duas distribuições, pode-se determinar a disponibilidade do

sistema, ou seja, o percentual de tempo em que este se encontra operante (NIST/SEMATECH, 2006; RELIASOFT, 2007).

Sistemas não reparáveis, por sua vez, são aqueles que não podem ser colocados novamente em operação após a ocorrência de uma falha, sendo removidos permanentemente. Nesses sistemas, utilizam-se os conceitos de taxas de falha ou de risco e de tempo médio até a falha (MTTF), uma vez que esses termos são aplicáveis apenas até a primeira falha de um item (NIST/SEMATECH, 2006).

Um item é classificado como não reparável quando se tem interesse nele apenas até a ocorrência da primeira falha. Em alguns casos, o item pode ser literalmente não reparável, de modo que seja descartado na primeira falha, enquanto que, em outros casos, o item pode ser reparado, mas ou o concerto é economicamente inviável ou não se tem interesse no que ocorre com este após a primeira falha (RAUSAND; HOYLAND, 2003; RELIASOFT, 2007).

### 2.2.2 Principais funções utilizadas em estudos de confiabilidade

As principais funções utilizadas em estudos de confiabilidade são: a função de risco, a função confiabilidade, a função densidade de falhas e a função acumulada de falhas. Conhecidas essas funções, a maior parte dos problemas da engenharia de confiabilidade podem ser resolvidos (KECECIOGLU, 2002).

#### 2.2.2.1 Função de risco ou taxa de falha

A função de risco ou taxa de falha ( $h(t)$ ) representa a probabilidade de falha no intervalo  $t$  a  $(t + dt)$ , dado que não haja falha no tempo  $t$ . É utilizada para se estudar o comportamento das falhas do sistema com o tempo. Considerando que (i)  $h(t_i)$  = função de risco no tempo  $t_i$ ; (ii)  $n_f(\Delta t_i)$  = número de falhas no intervalo  $\Delta t$ ; (iii)  $n_s(t_i-1)$  = número de sobreviventes no início do intervalo  $t_i$ ; e (iv)  $\Delta t_i$  = intervalo de tempo  $(t_i-1, t_i)$ , a função de risco pode ser expressa como (ELSAYED, 1996):

$$h(t_i) = \frac{n_f(\Delta t_i)}{n_s(t_i - 1)\Delta t_i} \quad (1)$$

A taxa de falha de um componente é genericamente modelada através da curva da banheira (Figura 1). As regiões da curva estão associadas com os períodos característicos da vida do componente, que são a mortalidade infantil, vida útil e desgaste. A Figura 2 é um pouco mais realista, na medida em que mostra a curva da banheira como sendo a soma de três distribuições distintas de falha sobrepostas (CROWE; FEINBERG, 2001; SMITH, 2001).

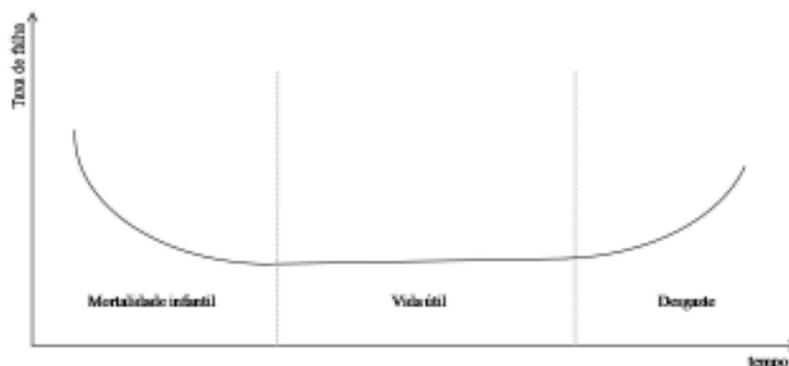


Figura 1: Curva da banheira  
FONTE: adaptado de Smith (2001).

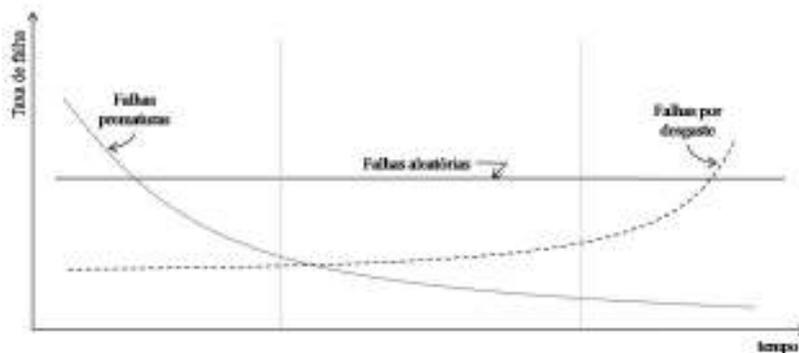


Figura 2: Composição da curva da banheira  
FONTE: adaptado de Smith (2001).

A curva da banheira não retrata a taxa de falha de um único item, e sim a taxa de falha relativa a uma população inteira de produtos ao longo do tempo. Assim, é de se esperar que, em uma população, algumas unidades individuais falhem relativamente cedo (mortalidade infantil), enquanto outras falhem apenas no período de desgaste ou durante o período de vida útil. Os tempos de duração desses períodos podem variar muito, podendo ser de dias até anos, dependendo do produto (WILKINS, 2002<sup>a</sup>).

O período de mortalidade infantil representa uma pequena parcela da população que falha, normalmente no primeiro ano, devido a possíveis defeitos de fabricação que não são detectados. São as denominadas falhas prematuras, altamente indesejadas, uma vez que

provocam insatisfação dos clientes com o produto, além de custos do produtor com os reparos (produtos em garantia). Nesse período, a taxa de falhas é decrescente com o tempo. Seus efeitos podem ser minimizados através da melhoria do processo de manufatura e do controle de qualidade dos produtos, além de planos de inspeção mais rigorosos (CROWE; FEINBERG, 2001; ELSAYED, 1996; WILKINS, 2002<sup>a</sup>).

O período de vida útil é caracterizado por taxas de falhas constante, geralmente de natureza aleatória e, por isso, difíceis de serem evitadas. A vida útil de um produto é normalmente limitada por seu componente de vida mais curta. Algumas das razões para sua ocorrência são a não detecção de defeitos, abusos, fatores de segurança baixos, condições ambientais inevitáveis e erro humano (DHILLON, 2005; LAFRAIA, 2001; WILKINS, 2002<sup>a</sup>).

O período de desgaste representa o início do término da vida útil do componente, possuindo uma taxa de falhas crescente com o tempo. Nesse período, as falhas já não são atribuídas à aleatoriedade, e sim à idade e ao desgaste do componente. Dentro desta região, a taxa de falhas aumenta rapidamente à medida que o produto atinge o final de sua vida útil. Para minimizar seu efeito, deve-se realizar manutenção preventiva periodicamente ou então fazer a substituição do produto (CROWE; FEINBERG, 2001; ELSAYED, 1996; LAFRAIA, 2001).

Cada região da curva da banheira pode ser modelada com uma distribuição de confiabilidade diferente. As três principais distribuições utilizadas são a de Weibull, a exponencial e a lognormal. A Weibull e a lognormal são comumente usadas nas porções da curva onde ocorrem variações da taxa de falha com o tempo, enquanto a distribuição exponencial é usada na porção constante da curva. Na realidade, não existe nenhuma regra definida. O fator decisivo na escolha de um tipo de distribuição em detrimento a outro é a adaptação dos dados à função (CROWE; FEINBERG, 2001).

Nem todos os componentes apresentam todas as fases da curva e, além disso, o comprimento de cada região da curva também pode variar de um componente para outro. Programas de computadores (*softwares*), por exemplo, normalmente possuem apenas a região de mortalidade infantil. À medida que os erros vão sendo corrigidos, as falhas desaparecem. Todos os tipos de peças, sejam mecânicos ou eletrônicos, estão também sujeitos a falhas precoces, devido a defeitos intrínsecos de fabricação. Mas grande parte dos componentes eletrônicos apresentam falhas aleatórias e, portanto, são descritos apenas pela região de vida útil, onde as taxas de falha são constantes com o tempo. Alguns componentes mecânicos

apresentam apenas o período de desgaste, de modo que desde o início da operação, os componentes começam a sofrer desgaste e, portanto, a taxa de falha aumenta com o tempo (LAFRAIA, 2001; WILKINS, 2002<sup>b</sup>).

### 2.2.2.2 Função densidade de falha e função acumulada de falha

A função densidade de falha ( $f(t)$ ) representa a forma como os dados se distribuem no decorrer do tempo em termos de frequência de ocorrência, permitindo a determinação do número de falhas que ocorrem durante esse período de tempo. Tempo, nesse caso, não precisa ser apenas unidade de medida de tempo, podendo ser também número de ciclos, número de rotações, entre outros (KECECIOGLU, 2002; RAUSAND; HOYLAND, 2003).

A função acumulada de falha ( $F(t)$ ), por sua vez, difere apenas por representar o somatório das falhas que ocorrem durante esse mesmo período de tempo. Matematicamente, corresponde ao número total de unidades falhas ( $n_f$ ) com relação ao número total de unidades operacionais inicialmente ( $n_o$ ), ou seja (RAUSAND; HOYLAND, 2003):

$$F(t) = \frac{n_f(t)}{n_o} \quad (2)$$

Ambas as funções representam, portanto, a distribuição do tempo até a falha das unidades em operação. Esse tempo até falha normalmente corresponde a uma variável discreta. Como uma variável discreta pode ser aproximada por uma variável contínua, assume-se que o tempo até falha apresenta uma distribuição contínua, podendo, portanto, ser representado por essas duas funções (RAUSAND; HOYLAND, 2003). A Figura 3 e a Figura 4 apresentam um exemplo da representação gráfica, tanto discreta como contínua, da função densidade de falha e da função acumulada de falha, respectivamente.

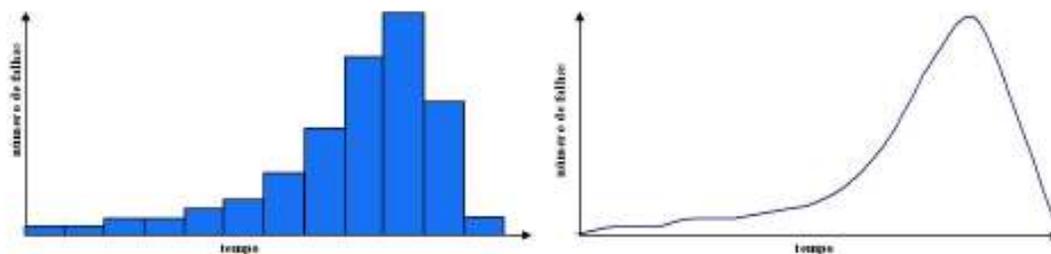


Figura 3: Função densidade de falha  $f(t)$

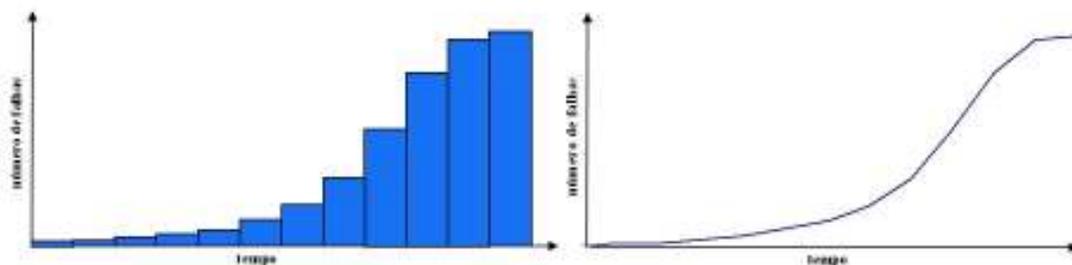


Figura 4: Função Acumulada de falha  $F(t)$

### 2.2.2.3 Função de confiabilidade

A função de confiabilidade ( $R(t)$ ) permite a determinação da probabilidade de qualquer componente ou sistema de desempenhar sua função por um período de tempo determinado. Essa função pode ser obtida pela observação do número total de unidades que não falharam ( $n_s$ ) com relação ao número total de unidades operacionais no instante inicial ( $n_o$ ), ou seja (KECECIOGLU, 2002):

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n_s(t) + n_f(t)} = \frac{n_s(t)}{n_o} \quad (3)$$

Comparando essa expressão matemática com a expressão da função acumulada de falha, percebe-se que uma corresponde ao complemento da outra. A Figura 5 mostra a representação gráfica (discreta e contínua) dessa função, podendo-se perceber que a confiabilidade de um item diminui com o tempo.

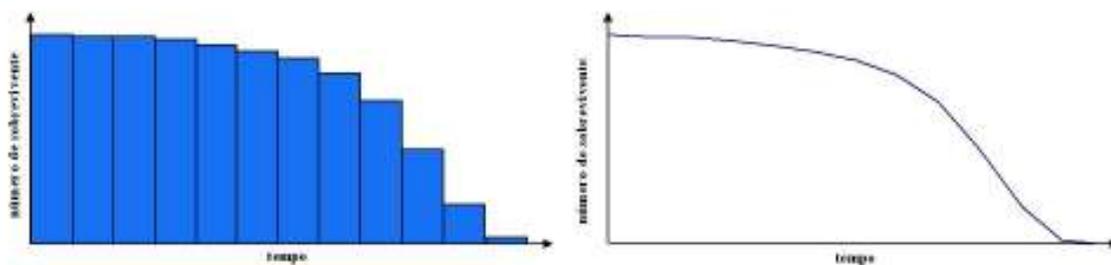


Figura 5: Função Confiabilidade  $R(t)$

### 2.2.2.4 Relação entre as funções

Como já foi mostrado anteriormente, pode-se perceber que a função confiabilidade representa o complemento da função acumulada de falha, de maneira que, enquanto a primeira mostra a quantidade de itens sobreviventes com o tempo, a segunda mostra a quantidade de itens que falharam nesse mesmo período de tempo. Mas não são apenas essas duas funções que se relacionam entre si, na verdade, a maioria das funções de confiabilidade pode ser derivada das demais. Leemis (1995) demonstrou a relação entre as funções acumulada de falha, densidade de falha, confiabilidade e de risco, sintetizadas na Figura 6.

	$F(t)$	$f(t)$	$R(t)$	$h(t)$
$F(t)$	-	$\int_0^t f(u)du$	$1 - R(t)$	$1 - \exp\left(\int_0^t h(u)du\right)$
$f(t)$	$\frac{dF(t)}{dt}$	-	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$h(t) \exp\left(-\int_0^t h(u)du\right)$
$R(t)$	$1 - F(t)$	$\int_t^\infty f(u)du$	-	$\exp\left(-\int_0^t h(u)du\right)$
$h(t)$	$\frac{dF(t)/dt}{1 - F(t)}$	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(u)du}$	$-\frac{d}{dt} \ln R(t)$	-

Figura 6: Relações entre as funções  $F(t)$ ,  $f(t)$ ,  $R(t)$  e  $h(t)$   
 FONTE: Leemis (1995).

O tempo médio entre falhas também pode ser derivado dessas funções, correspondendo a (ELSAYED, 1996):

$$MTTF = \int_0^\infty R(t)dt = \int_0^\infty tf(t)dt \quad (4)$$

A função de risco é obtida a partir da seguinte relação:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (5)$$

## 2.3 Distribuições de probabilidade associadas à confiabilidade

Segundo Crowe e Feinberg (2001), as principais distribuições de probabilidade associadas à confiabilidade são as distribuições normal, exponencial, lognormal e de Weibull.

### 2.3.1 Distribuição normal

Esta distribuição foi desenvolvida por Abraham de Moivre, em 1733, mas devido a erro histórico foi atribuída a Carl Gauss e, por isso, é muitas vezes denominada como distribuição de Gauss ou Gaussiana. Os parâmetros que caracterizam essa distribuição são a média ( $\mu$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) (DHILLON, 2002).

Ao contrário das demais distribuições, a distribuição normal não é utilizada para modelar a curva da banheira, sendo comumente utilizada para analisar dados variáveis ou paramétricos, assim como no monitoramento de processos e cartas de controle (CROWE; FEINBERG, 2001).

A Figura 7 apresenta a representação matemática e gráfica dessa distribuição com relação à sua função de risco, função densidade de falha e função confiabilidade.

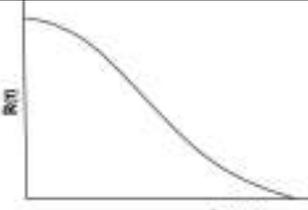
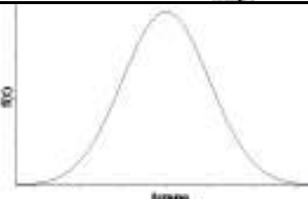
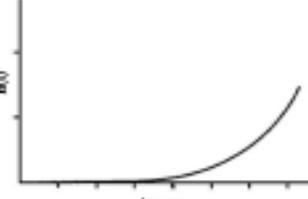
<i>Função</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Exemplo gráfico</i>
Função confiabilidade	$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)$	
Função densidade de falha	$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]}$	
Função de risco	$h(t) = \frac{\phi\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)}{\sigma R(t)}$	

Figura 7: Representação gráfica e matemática da distribuição normal  
 FONTE: adaptado de Elsayed (1996) e Lafraia (2001).

### 2.3.2 Distribuição exponencial

Esta é uma das distribuições de probabilidade mais utilizadas na engenharia, principalmente na área de confiabilidade. A distribuição exponencial é caracterizada por

possuir taxa de falha constante, descrevendo apenas a porção de vida útil da curva da banheira. É a distribuição mais simples, sendo definida por apenas um parâmetro: a taxa de falha ( $\lambda$ ). Mesmo assim, possui grande aplicabilidade, uma vez que muitos componentes passam a maior parte de sua vida na região de vida útil da curva da banheira (CROWE; FEINBERG, 2001; DHILLON, 2002; NIST/SEMATECH, 2006).

A Figura 8 apresenta a representação matemática e gráfica dessa distribuição com relação à sua função de risco, função densidade de falha e função confiabilidade.

<i>Função</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Exemplo gráfico</i>
Função confiabilidade	$R(t) = e^{-\lambda t}$	
Função densidade de falha	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	
Função de risco	$h(t) = \lambda$	

Figura 8: Representação gráfica e matemática da distribuição exponencial  
 FONTE: adaptado de Elsayed (1996) e Lafraia (2001).

### 2.3.3 Distribuição lognormal

A distribuição lognormal é um modelo muito flexível que pode ajustar muitos tipos de dados de falhas. Representa qualquer uma das três regiões da curva da banheira, sendo mais utilizada na região de desgaste, especialmente em componentes eletrônicos. É caracterizada por dois parâmetros de distribuição: o parâmetro de forma ( $\sigma$ ) e o parâmetro de escala (a média -  $\mu$ ) (CROWE; FEINBERG, 2001; NIST/SEMATECH, 2006).

Sua relação com a distribuição normal (apenas tirando logaritmos naturais de todos os pontos de dados e de tempo gera-se dados “normais”) faz com que seja matematicamente fácil de utilizar essa distribuição, com muitos programas de *software* disponíveis para a análise de dados normais. É adequada em testes acelerados de vida, além de ser uma boa opção em análise de dados de processos de degradação comuns em eletrônica, tais como corrosão, difusão, entre outros (NIST/SEMATECH, 2006).

A Figura 9 apresenta a representação matemática e gráfica dessa distribuição com relação à sua função de risco, função densidade de falha e função confiabilidade.

<i>Função</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Exemplo gráfico</i>
Função confiabilidade	$R(t) = \Phi\left(\frac{-(\ln(t) - \mu)}{\sigma}\right)$	
Função densidade de falha	$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}\right)^2\right]}$	
Função de risco	$h(t) = \frac{\phi\left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right)}{\sigma R(t)}$	

Figura 9: Representação gráfica e matemática da distribuição lognormal  
 FONTE: adaptado de Elsayed (1996) e Lafraia (2001).

### 2.3.4 Distribuição de Weibull

Esta distribuição foi desenvolvida por Waloddi Weibull, do *Royal Institute of Technology* (Estocolmo), no início dos anos 1950. A distribuição de Weibull é útil para representar diferentes fenômenos físicos (DHILLON, 2002).

Três parâmetros descrevem essa distribuição: de forma ( $\beta$ ), de escala ( $\eta$ ) e de posição ( $\gamma$ ). O parâmetro de forma permite que a distribuição de Weibull assumira uma variedade de formas, sendo, por isso, considerada uma das distribuições mais flexíveis para ajuste de dados. A distribuição exponencial e a de Rayleigh são casos especiais da distribuição de Weibull quando o parâmetro de forma é, respectivamente, igual a 1 e a 2. (CROWE; FEINBERG, 2001; NIST/SEMATECH, 2006).

A distribuição de Weibull pode representar qualquer uma das três regiões da curva da banheira, de acordo com seu parâmetro de forma (Figura 10). É, contudo, mais utilizada na região de mortalidade infantil, especialmente em microeletrônica (CROWE; FEINBERG, 2001).

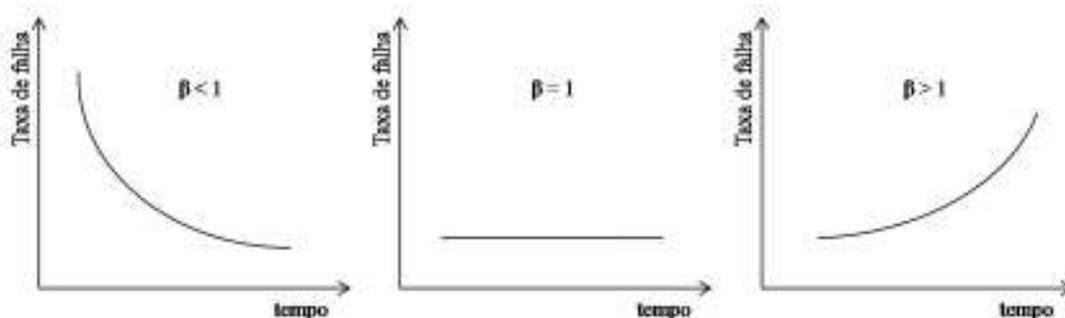


Figura 10: Relação entre  $\beta$  e as regiões da curva da banheira  
 FONTE: adaptado de Crowe e Feinberg (2001).

Nessa distribuição, frequentemente o parâmetro de posição não é utilizado, sendo seu valor considerado como zero. Existem também casos em que o parâmetro de forma ( $\beta$ ) pode ser suposto de antemão, simplificando a análise. Nesse caso, somente o parâmetro de escala precisa ser estimado, possibilitando assim uma análise com poucos dados. Para tanto, porém, é necessário que se tenha uma estimativa muito boa e justificável para o valor de  $\beta$  (RELIASOFT BRASIL, 2007).

A Figura 11 apresenta a representação matemática e gráfica dessa distribuição com relação à sua função de risco, função densidade de falha e função confiabilidade.

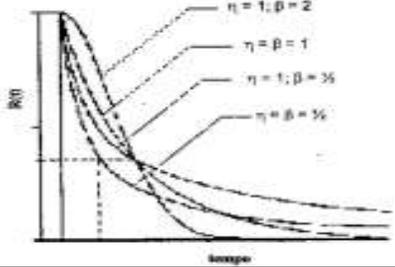
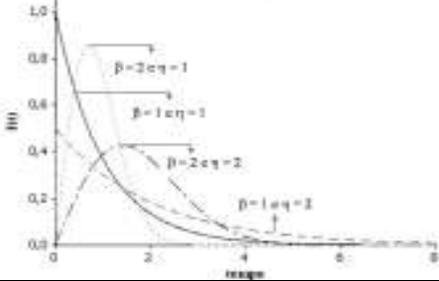
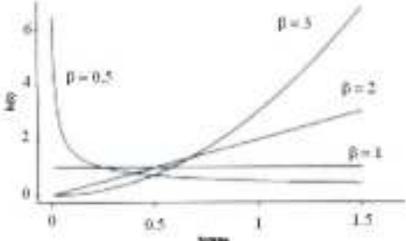
<i>Função</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Exemplo gráfico</i>
Função confiabilidade	$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$	
Função densidade de falha	$f(t) = \frac{\beta}{\eta} (t-\gamma)^{\beta-1} e^{-\frac{(t-\gamma)^\beta}{\eta}}$	
Função de risco	$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$	

Figura 11: Representação gráfica e matemática da distribuição de Weibull  
 FONTE: adaptado de Elsayed (1996) e Lafraia (2001).

## 2.4 Parâmetros das distribuições de probabilidade

Segundo Kececioglu (2002), as distribuições de probabilidade são definidas uma vez que seus parâmetros sejam conhecidos. Os parâmetros correspondem a um ou mais valores constantes que determinam o formato, a posição e a escala da distribuição.

### 2.4.1 *Parâmetro de forma*

Muitas distribuições de probabilidade não são uma única distribuição, mas uma família de distribuições. Isso ocorre devido à presença de um ou mais parâmetros de forma, que permite com que a distribuição adquira diversos formatos, dependendo do seu valor (NIST/SEMATECH, 2006).

Nem todas as distribuições possuem este parâmetro. As distribuições normal e exponencial, por exemplo, por possuírem sempre o mesmo formato, não possuem este parâmetro. Já as distribuições de Weibull e a lognormal possuem parâmetro de forma ( $\beta$  e  $\sigma$ , respectivamente), o que significa que tais distribuições possuem uma variedade de formatos distintos. A Figura 12 apresenta um exemplo do efeito da mudança desse parâmetro numa distribuição de Weibull (com  $\eta = 1$  e  $\gamma = 0$ ) (KECECIOGLU, 2002).

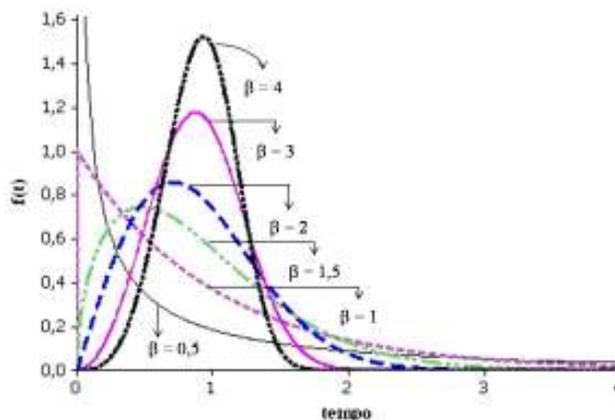


Figura 12: Efeito do parâmetro de forma na distribuição de Weibull  
 FONTE: autor.

#### 2.4.2 *Parâmetro de escala*

O parâmetro de escala determina a largura da curva, de modo que uma variação nesse parâmetro tem como efeito uma mudança no eixo da abscissa. Como a área sob a curva é um valor constante e igual a 1, ao se alargar ou comprimir a curva, seu pico irá, respectivamente, diminuir ou aumentar. Este parâmetro está presente nas distribuições normal ( $\sigma$ ), lognormal ( $\mu$ ), exponencial ( $\lambda$ ) e de Weibull ( $\eta$ ) (KECECIOGLU, 2002; RELIASOFT BRASIL, 2007).

A Figura 13 traz um exemplo da influência desse parâmetro na distribuição de Weibull. Assim, se  $\eta$  é aumentado, enquanto  $\beta$  e  $\gamma$  são mantidos constantes, a curva da distribuição se estende, se estica para direita e, conseqüentemente, sua altura diminui. Da mesma forma, se  $\eta$  é diminuído, enquanto  $\beta$  e  $\gamma$  são mantidos constantes, a curva da distribuição se estreita para dentro, para esquerda, aumentando sua altura (KECECIOGLU, 2002).

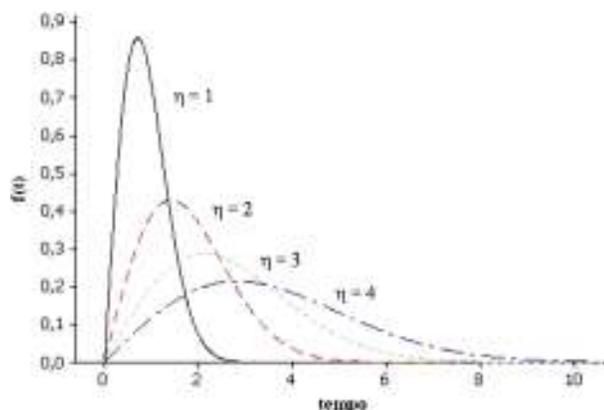


Figura 13: Efeito do parâmetro de escala na distribuição de Weibull  
 FONTE: autor.

### 2.4.3 *Parâmetro de localização*

O parâmetro de localização indica o valor inicial (posição) da distribuição de probabilidade ao longo do eixo da abscissa. Em outras palavras, representa o deslocamento da função no eixo das abscissas em relação ao eixo das coordenadas havendo, portanto, três possibilidades: (i) quando o parâmetro de localização é zero, a distribuição inicia na origem; (ii) quando o parâmetro é positivo, a distribuição inicia-se à direita da origem e; (iii) quando o parâmetro é negativo, a distribuição inicia-se à esquerda da origem (KECECIOGLU, 2002).

O parâmetro de localização está presente nas distribuições normal ( $\mu$ ) e de Weibull ( $\gamma$ ). Apesar de nem todas as distribuições apresentarem esse parâmetro, na maioria das vezes ele pode ser incorporado na distribuição simplesmente substituindo a variável tempo ( $t$ ) por  $(t - \gamma)$ . A Figura 14 apresenta um exemplo do efeito da mudança desse parâmetro numa distribuição de Weibull (com  $\beta = 2$  e  $\eta = 1$ ) (KECECIOGLU, 2002).

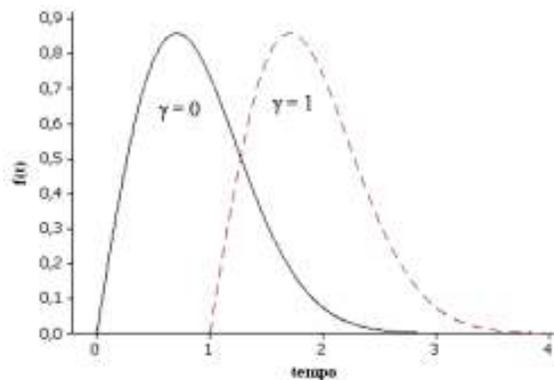


Figura 14: Efeito do parâmetro de localização na distribuição de Weibull  
 FONTE: autor.

## 2.5 Métodos de estimação dos parâmetros das distribuições

As distribuições de probabilidade são caracterizadas por parâmetros, que devem ser estimados de modo a serem imparciais, coerentes, eficientes e suficientes. Isso significa que um bom estimador não deve nem subestimar nem superestimar o verdadeiro valor do parâmetro. Deve ainda convergir rapidamente ao valor verdadeiro à medida que o tamanho da amostra aumenta, possuir um desvio padrão menor do que o desvio padrão de qualquer outro estimador para o mesmo parâmetro de uma população, além de utilizar todas as informações que possui sobre o parâmetro. A exatidão das estimativas dos parâmetros depende do tamanho da amostra e do método de estimação utilizado (ELSAYED, 1996).

Segundo Elsayed (1996), os três principais métodos para estimar os parâmetros das distribuições são: o método dos momentos, o método da máxima verossimilhança e o método dos mínimos quadrados.

### 2.5.1 *Método dos momentos*

A idéia principal do método dos momentos é a de equiparar determinadas características da amostra aos valores correspondentes esperados para a população e então resolver as equações resultantes a fim de obter um valor estimado para o parâmetro desconhecido (ELSAYED, 1996).

Esse método apresenta como vantagem sua simplicidade, sendo usado principalmente para se encontrar um valor inicial a ser utilizado em métodos mais precisos, como o da máxima verossimilhança e o dos mínimos quadrados. Sua desvantagem é a de frequentemente não estar disponível ou não possuir as propriedades de otimização desejável aos demais métodos (NIST/SEMATECH, 2006).

### 2.5.2 *Método da máxima verossimilhança*

O método da máxima verossimilhança estima os valores da distribuição que maximiza a função de verossimilhança. A função de verossimilhança expressa a probabilidade de se obter um conjunto específico de dados a partir de um determinado modelo de distribuição. Os valores dos parâmetros desse modelo que maximizam a verossimilhança são conhecidos como

estimativas de máxima verossimilhança. O objetivo desse método é, portanto, determinar a melhor estimativa dos parâmetros através da utilização da função de verossimilhança. Isso pode ser conseguido através do desenvolvimento da função de verossimilhança para as observações e obtenção de sua expressão logarítmica, que é então derivada em relação aos parâmetros. As equações resultantes são igualadas a zero e resolvidas simultaneamente, obtendo-se assim a melhor estimativa dos parâmetros que maximizam a função de verossimilhança (ELSAYED, 1996).

Este método apresenta a vantagem de poder ser aplicado a uma ampla variedade de situações de estimação de parâmetros, além de possuir propriedades desejáveis de otimização (à medida que o tamanho da amostra aumenta, a variância da estimativa dos parâmetros diminui). Suas desvantagens são a de usualmente demandar cálculos matemáticos complexos, especialmente se intervalos de confiança forem requeridos, possuir estimadores altamente tendenciosos quando se tem amostras pequenas, além de ser sensível à escolha do valor inicial (NIST/SEMATECH, 2006).

### 2.5.3 *Método dos mínimos quadrados*

O método dos mínimos quadrados fornece um estimador eficaz e imparcial para os parâmetros da distribuição. Esse método define o melhor ajuste como aquele que minimiza a soma dos quadrados das diferenças entre a curva ajustada e os dados observados. Sua vantagem é a de existir muitos pacotes de *softwares* estatísticos que disponibilizam a resolução de problemas por esse método. Como desvantagens encontram-se o fato de não ser aplicável a dados censurados e de ser sensível à escolha do valor inicial (ELSAYED, 1996; NIST/SEMATECH, 2006).

## 2.6 **Confiabilidade de sistemas**

Como já foi visto, a confiabilidade é definida como a habilidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições definidas de uso por um determinado período de tempo. Porém, quando unidades são agrupadas de maneira a formar um sistema, a confiabilidade passa a corresponder ao sistema de controle de falhas. Nesse sentido, sendo possível prever a frequência e a forma exata em que o sistema irá falhar, controles podem ser implementados para minimizar os efeitos da falha, tais como diferentes formas de

redundâncias e técnicas de correlação de falhas. Na confiabilidade de sistema é possível, portanto, determinar médias ou probabilidades de ocorrência, mas não o tempo exato de previsão para um evento específico (LAFRAIA, 2001; MALEC, 1995).

Um sistema corresponde a um conjunto de componentes, dispostos de acordo a um projeto específico, de forma a atender as funções desejadas e apresentar desempenho e confiabilidade aceitáveis. É necessário descrever o sistema como um número de blocos funcionais que são interconectados de acordo com o efeito de cada falha na confiabilidade total do sistema, uma vez que a confiabilidade em sistemas será fortemente influenciada pela confiabilidade intrínseca das partes e da natureza das conexões entre elas. A dependência de um sistema para outro pode variar desde a total dependência (qualquer falha em B gera uma falha em A) até a total independência (B não causa qualquer falha em A) (AVIZIENIS et al., 2004; ELSAYED, 1996; SMITH, 2001).

Duas conexões básicas descrevem a maioria dos sistemas: em série e em paralelo. O sistema em série (Figura 15a) é representado por um diagrama de blocos dispostos lado a lado, de modo que a falha de qualquer um dos blocos impede a operação do sistema. Neste caso, a confiabilidade do sistema será menor do que a confiabilidade de seu componente mais fraco e, portanto, quanto menor o número de componentes, maior a confiabilidade e mais simples é a manutenção (Eq. 6). Por outro lado, os componentes são considerados em paralelo (Figura 15b) quando a falha do sistema só ocorrer quando todos os componentes falharem. Neste caso, a confiabilidade do sistema será maior que a confiabilidade do melhor dos componentes (Eq. 7). Conexões mistas (Figura 15c e d, por exemplo) podem ser calculadas decompondo o arranjo em suas conexões básicas (ELSAIED, 1996; LAFRAIA, 2001; SMITH, 2001).

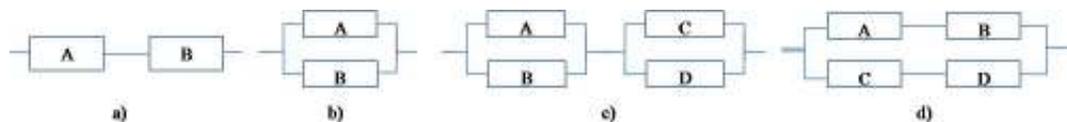


Figura 15: Tipos de conexões em sistemas: a) série, b) paralelo, c) série-paralelo e d) paralelo-série

$$R_{série} = P(1) \times P(2) \times P(3) \times \dots \times P(n) = \prod_{i=1}^n P(x_i) \quad (6)$$

$$R_{paralelo} = 1 - [(1 - P(1)) \times (1 - P(2)) \times \dots \times (1 - P(n))] = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(x_i)) \quad (7)$$

Segundo Smith (2001), para se definir os blocos, deve-se levar em consideração as seguintes regras gerais: cada bloco deve representar o número máximo dos componentes a fim de simplificar o diagrama; a função de cada bloco deve ser facilmente identificada; os blocos devem ser mutuamente independentes, de modo que a falha em um não afete a probabilidade da falha em outro; os blocos não devem conter nenhuma redundância significativa, caso contrário, as taxas de falhas dentro do bloco não seriam válidas; cada unidade substituível deve ser um número de blocos inteiro; cada bloco deve conter uma tecnologia, isto é, eletrônico ou eletromecânico; e deve haver somente um ambiente dentro de um bloco.

A confiabilidade de um sistema deve refletir o desempenho esperado pelo consumidor durante a utilização e, por isso, é necessário que se entenda para que e como o sistema será utilizado e o que o consumidor espera como uma performance confiável. Seu objetivo principal é prevenir a ocorrência de falhas que afetem a capacidade operacional do sistema, além de balancear o risco com o benefício da atividade e o custo de sua redução. É uma técnica amplamente utilizada, porque nenhuma atividade humana é imune ao risco, bem como nenhum equipamento possui taxa de falha igual a zero (MALEC, 1995; SMITH, 2001).

A melhoria da confiabilidade é consequência natural da análise de falha durante o desenvolvimento de projeto, processo e utilização. Isso é conseguido, no projeto, através da redução da complexidade do sistema, redução dos fatores de *stress*, utilização de redundâncias, revisão e avaliação do projeto (através de técnicas de análise de falhas, tais como a FMEA e a FTA), além da execução exaustiva de testes. Esses testes podem contemplar o processo, através do controle dos materiais, métodos e mudanças, bem como o controle dos métodos de trabalho; e a utilização do produto ou equipamento, através de instruções adequadas de operação e de manutenção, retorno das informações de falha em campo e estratégias de recolocação (trocas) (HECHT, 2003; SMITH, 2001).

Quanto à realização de reparos e/ou manutenções, Shaked e Shanthikumar (1992) demonstraram matematicamente o melhor local para se realizar reparos mínimos nos sistemas. Diz-se que um componente sofreu reparos mínimos quando, após falha e reparo, o componente encontra-se tão bom quando estava logo antes da falha. Segundo esses autores, em sistemas em paralelo, todos os reparos mínimos devem ser realizados sobre um componente e, em sistemas em série, tais reparos devem ser realizados igualmente sobre todos os componentes. Tais resultados estão de acordo com a realidade. Como um sistema em paralelo funciona até a falha de seu componente mais forte, se todos os reparos forem realizados sobre o mesmo componente, as chances de que esse componente continue em

operação são maiores, maximizando assim a confiabilidade desse sistema. Nem sempre é possível atribuir todos os reparos a um mesmo componente, o que se procura, nessa situação, é atribuir o número máximo de reparos possíveis a um determinado componente. Um sistema em série, por sua vez, por durar apenas até o seu componente mais fraco, o ideal é que os reparos sejam alocados igualmente entre todos os componentes, a fim de maximizar a confiabilidade desse tipo de sistema (SHAKED; SHANTHIKUMAR, 1992).

A adição de redundâncias no sistema faz com que este se torne mais confiável à medida que diminui a probabilidade de falha durante um determinado período de tempo. Como a adição de redundâncias no sistema implica na adição de custos, normalmente são feitas análises de viabilidade econômica, a fim de determinar se o real incremento na confiabilidade condiz com o incremento no custo de operação que se terá (aquisição de equipamentos, custos com energia, entre outros) (SMITH, 2001).

Os itens redundantes podem se encontrar ativos ou em *standby*. Conforme pode ser visto na Figura 16, as redundâncias ativas podem ser totais, parciais ou condicionais, enquanto que as em *standby* podem ser com itens idênticos ou diferentes. Quando se fala em sistemas com redundância, normalmente se considera que os itens que falham não são reparados até que o sistema como um todo falhe (SMITH, 2001).



Figura 16: Redundância  
FONTE: adaptado de Smith (2001).

A redundância é considerada ativa quando todos os itens do sistema estão operando e o sistema continua funcionando mesmo que um ou mais itens falhem. A redundância ativa total é aquela em que o sistema falha apenas quando todos os itens falham. Esse é o caso de sistemas em paralelo. Já a redundância ativa parcial é aquela onde o número de itens que pode falhar antes que o sistema falhe é inferior do que no caso anterior, uma vez que são necessários mais de um item funcionando para que o sistema opere. A redundância ativa condicional é, por sua vez, aquela onde a resposta está relacionada com o modo de falha. Assim, se dois ou mais itens falharem no mesmo modo de falha, o sistema irá falhar. Porém,

se a falha ocorrer de modo diferente entre os itens, o sistema continuará funcionando (LAFRAIA, 2001; SMITH, 2001).

A redundância em *standby* é aquela que envolve itens adicionais ao sistema que apenas são acionados quando o item respectivo (aquele que exerce a mesma função) falha. Nesses sistemas, são feitas as seguintes considerações: o sensor que detecta que uma falha ocorreu, trocando o item falho pelo em *standby* é livre de falha; os itens em *standby* possuem taxas de falha idênticas ao item em operação; os itens em *standby* não falham enquanto em estado de espera e; os itens defeituosos não são reparados até que o sistema como um todo falhe (SMITH, 2001).

A Figura 17 mostra que a confiabilidade em sistemas redundantes é superior ao de sistemas sem redundância no início da vida útil, mas eventualmente decai mais acentuadamente. Quanto maior o número de itens redundantes, maior o período com alta confiabilidade e mais acentuado é o declínio desta. Esta característica de redundância se aplica, em princípio, a todas as configurações redundantes, variando-se apenas os valores específicos (SMITH, 2001).

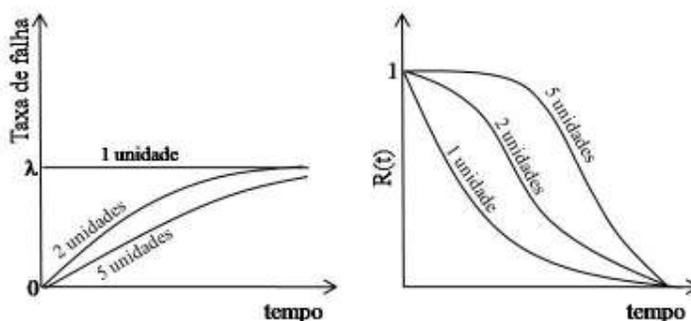


Figura 17: Efeito na confiabilidade e taxa de falha conforme quantidade de itens redundantes no sistema  
 FONTE: adaptado de Smith (2001).

Na redundância em *standby*, melhora na confiabilidade do sistema é maior do que no caso de redundância ativa, uma vez que os itens em *standby* operam por menos tempo (apenas quando ocorre a falha). Além disso, na redundância ativa, os itens não são independentes entre si, o que significa que a falha de um item pode causar ou acelerar a falha dos demais. A Figura 18 mostra essa comparação entre os tipos de redundância para o caso onde a taxa de falha do sistema sem redundância é constante (distribuição exponencial), mas o conceito é válido para os demais tipos de distribuição também. O que se percebe através dessa figura é que sistemas com redundância apresentam menor taxa de falha e maior confiabilidade do que

sistemas sem redundância e, entre os sistemas redundantes, os em *standby* possuem maior confiabilidade e menor taxa de falha (SMITH, 2001).

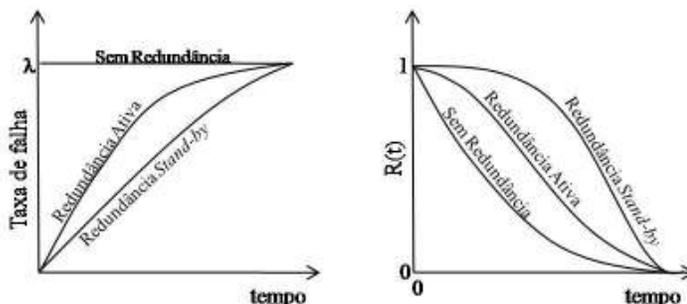


Figura 18: Efeito na confiabilidade e taxa de falha conforme tipo de redundância empregada  
FONTE: adaptado de Smith (2001).

A determinação do local onde a redundância deve ser alocada no sistema é um problema que deve ser resolvido com o intuito de aumentar a confiabilidade. Boland, El-Newehi e Proschan (1992), já percebendo essa dificuldade, demonstraram matematicamente que, para redundâncias ativas, a melhor opção é que esta seja alocada junto ao componente mais fraco (menos confiável), independente da configuração do sistema. Já no caso de redundâncias em *standby*, a configuração do sistema influencia na escolha. Nesse caso, em sistemas em série, a melhor opção é alocar a redundância junto ao componente mais fraco (menos confiável), enquanto que, em sistemas em paralelo, esta deve ser alocada junto ao componente mais forte (mais confiável).

A redundância pode ser aplicada tanto no nível do componente como no do sistema. Kumar (1995) comparou a adição de redundância em *standby* sobre estes dois níveis, a fim de determinar qual resultaria em um maior incremento na confiabilidade do sistema. O que esse autor encontrou foi que, em sistemas em série, o ideal é que a redundância em *standby* seja feita no nível do componente, enquanto que em sistemas em paralelo o melhor é no nível do sistema.

A avaliação da confiabilidade de sistemas é uma atividade importante para garantir a confiabilidade dos produtos. Ao longo dos anos, muitos métodos de avaliação de confiabilidade foram desenvolvidos, como, por exemplo, a FTA, a FMEA, o método de decomposição, o método da determinação dos *tie-sets* e *cut-sets*, o método da tabela boolena, o método de simulação de Monte Carlo, entre outros. A utilização desses métodos para uma determinada aplicação depende de vários fatores, tais como o tipo de projeto em consideração, os requisitos especificados, as necessidades específicas, etc. A facilidade de utilização e a

exigência de experiência dos analistas podem variar de um método para outro (DHILLON, 2005; SMITH, 2001).

Nesse trabalho, será apresentado apenas a FMEA, por ser essa a ferramenta a ser utilizada para o desenvolvimento da pesquisa. Os demais métodos (não menos importantes) podem ser encontrados em Elsayed (1996). Antes, contudo, é necessário definir o que vem a ser uma falha.

## 2.7 Falhas

A definição de falha é um conceito fundamental para qualquer análise de confiabilidade. De maneira geral, uma falha consiste na interrupção ou alteração da capacidade de um item desempenhar uma função requerida ou esperada, sendo que item corresponde a qualquer parte, componente, dispositivo, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que possa ser considerado individualmente (ABNT, 1994; RAUSAND; OIEN, 1996; SIQUEIRA, 2005).

O termo falha (*failure*) é frequentemente confundido com os termos erro e defeito (*fault*), principalmente devido às traduções de seus respectivos termos em inglês. Isso gera a existência de diferentes definições para eles, muitas vezes conflitantes. A relação entre os termos falha e erro pode ser visualizada na Figura 19. O erro corresponde à discrepância entre o valor observado e o valor alvo (correto), não sendo considerado uma falha por encontrar-se dentro de limites aceitáveis de desvio do desempenho desejado. A falha corresponde, por sua vez, ao evento que ocorre quando a função requerida é perdida (excedendo os limites aceitáveis). O estado de um item caracterizado pela incapacidade de desempenhar sua função requerida é denominado estado de falha (AVIZIENIS et al., 2004; RAUSAND; OIEN, 1996).

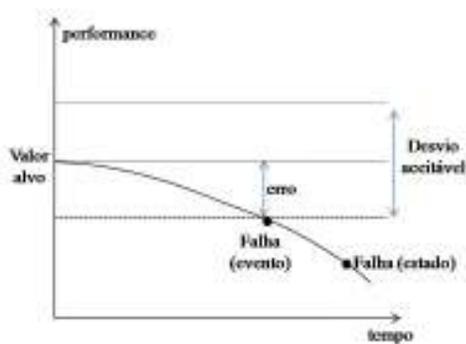


Figura 19: Diferença entre falha e erro  
 FONTE: adaptado de Rausand e Oien (1996).

Um erro pode ser referido como uma falha incipiente e é causado por um defeito. Um defeito pode ser tanto externo como interno. A ativação de um defeito interno latente ou a presença de um defeito externo pode gerar um erro. Um erro é sucessivamente transformado em outros erros (propagação), podendo gerar uma falha subsequente, dependendo da estrutura do sistema (existência de redundâncias) ou do comportamento deste. A falha de um item, por sua vez, pode ser a causa de um defeito em outro item ao qual esse se relaciona. A dependência entre esses três termos pode ser melhor visualizada através da Figura 20 (AVIZIENIS et al., 2004).



Figura 20: Dependência entre defeito, falha e erro  
 FONTE: adaptado de Avizienis et al. (2004).

As falhas podem ser classificadas sob vários aspectos, tais como origem, extensão, velocidade, manifestação, criticidade ou idade (Figura 21). Dessa maneira, as falhas podem ser, quanto à extensão, parciais ou completas, dependendo se conduzem à incapacidade do item de desempenhar alguma função requerida (sem perda total de sua funcionalidade) ou se ocorre perda total da função requerida deste. De acordo com a forma de manifestação da falha, essa pode ser catastrófica, quando ocorre simultaneamente de forma repentina e completa, ou pode ocorrer devido à degradação de forma gradual e parcial, podendo tornar-se completa ao longo do tempo. As falhas podem ainda ser classificadas de acordo com sua criticidade como críticas ou não críticas. Falhas críticas são aquelas que produzem condições perigosas ou inseguras para as pessoas, danos materiais ou ambientais, sendo as não críticas o oposto disso (ABNT, 1994; SIQUEIRA, 2005).

As falhas também podem ser classificadas segundo a rapidez com que ocorrem (velocidade), em graduais, quando podem ser percebidas e previstas por uma inspeção antes que ocorram, e em repentinas, no caso contrário. As falhas podem ter origem primária, quando decorrem de deficiências próprias; secundária, quando a falha é causada direta ou indiretamente pela falha de outro item; ou ainda de controle, quando ocorrem devido a ordens errôneas do operador ou uso inadequado pelo usuário. Por fim, as falhas podem ser classificadas quanto à idade, uma vez que influenciam na vida útil ou produtiva de um item. Sobre esse aspecto, as falhas podem ser prematuras, quando ocorrem no período inicial de vida do item (mortalidade infantil); aleatórias, quando ocorrem de maneira imprevisível,

durante todo o período de vida útil do item; ou progressivas, quando ocorrem após o período de vida útil, como resultado do processo de desgaste, deterioração e envelhecimento (ABNT, 1994; SIQUEIRA, 2005).

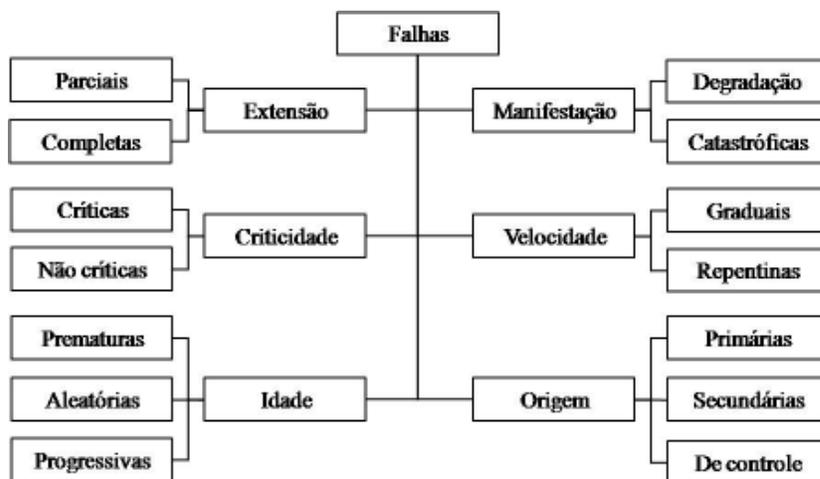


Figura 21: Classificação das falhas  
 FONTE: adaptado de Siqueira (2005).

## 2.8 Análise dos Efeitos e Modos de Falha (FMEA)

A FMEA é uma técnica de engenharia estruturada, indutiva, lógica e progressiva, utilizada com o intuito de definir, identificar, antecipar e eliminar falhas conhecidas e/ou potenciais do sistema, projeto, processo e serviço antes que estes cheguem ao consumidor. Análises semelhantes à FMEA são utilizadas há muitos anos, mas formalmente ela foi desenvolvida pela NASA, em 1963. Porém, somente após 1977 passou a ser mais utilizada, quando a *Ford Motors Company* começou a empregar a técnica na fabricação de seus automóveis. Apenas no ano 2000, a Sociedade dos Engenheiros Automotivos (SAE – *Society Automotive Engineers*) publicou os procedimentos especializados de FMEA para a indústria automotiva (GILCHRIST, 1993; HECHT, 2003; LAFRAIA, 2001; STAMATIS, 1995).

A FMEA é essencialmente utilizada para estudar as falhas que ocorrem em materiais e equipamentos, podendo ser também aplicada a uma ampla escala de tecnologias (como, por exemplo, em *softwares*). Foi inicialmente concebida para ser aplicada durante as fases de desenvolvimento de um produto ou de um serviço (quando está sendo definido e projetado) e quando a produção está sendo planejada. Após, passou a ser usada, também, no projeto de sistemas e nas demais fases do ciclo de vida do produto ou processo. Quando utilizada na fase de projeto, tem o objetivo de identificar, antecipadamente, todos os modos de falha

catastróficos ou críticos para que sejam eliminados ou minimizados no estágio inicial do desenvolvimento do sistema, evitando-se assim custos com mudanças ou retrabalhos em estágios posteriores. Outros objetivos da FMEA são: aumentar as atividades com foco no cliente, usar o conhecimento técnico de uma equipe multifuncional, dar suporte para a melhoria contínua, aperfeiçoar as lições aprendidas (através de documentação) e utilizar as melhores práticas da engenharia simultânea (CROWE; FEINBERG, 2001; GILCHRIST, 1993; LAFRAIA, 2001; SKELTON, 1997).

As atividades da FMEA devem ser planejadas desde o princípio do processo de desenvolvimento de produtos e de processos, e sua elaboração deve ser iniciada o mais cedo possível, mesmo que nem todos os fatos ou informações sejam ainda conhecidos. Assim, o melhor momento para iniciar uma FMEA é tão logo alguma informação esteja disponível. Após seu início, a FMEA deve ser constantemente atualizada conforme disponibilidade de informação, o que caracteriza seu dinamismo. A FMEA apenas pode ser considerada completa ou terminada quando o sistema, projeto, produto, processo ou serviço é considerado completo e/ou descontinuo. Pode ser, no entanto, reaberta para revisão, avaliação e/ou melhoria a qualquer momento (STAMATIS, 1995).

Rozenfeld et al. (2006) dividem a macrofase de desenvolvimento de produtos em cinco fases, iniciando pelo projeto informacional e seguindo para o projeto conceitual, projeto detalhado, preparação da produção do produto até o lançamento do produto. Esses autores consideram que o melhor momento para a aplicação da FMEA ocorre depois da atividade de detalhamento do sistema, subsistemas ou componentes, na fase do projeto detalhado. Quando utilizada antes disso, na fase de projeto conceitual, depara-se com o problema de falta de documentação detalhada e, assim, algumas falhas potenciais podem passar despercebidas.

Apesar desse inconveniente, Andrade, Zardo e Forcellini (2005) acreditam que a FMEA é perfeitamente passível de utilização já na etapa conceitual do produto, tornando-se assim um instrumento de auxílio à seleção de concepções e não somente um mero instrumento de otimização. Para esses autores, a utilização da FMEA nessa etapa possui a vantagem de possibilitar a detecção de problemas mais cedo e, assim, resolvê-los com o menor custo possível.

A FMEA deve ser conduzida por uma equipe de 5 a 9 pessoas (preferencialmente cinco), composta de indivíduos provenientes de diferentes áreas (equipe multidisciplinar). Não deve nunca ser conduzida por apenas um indivíduo. A equipe formada identifica as funções do produto e seleciona então os modos de falha. A orientação geral é selecionar as

funções principais e negligenciar aquelas que são consideradas menos importantes de acordo com o objetivo da avaliação. Após finalizar a análise contendo as principais funções, se necessário, as demais podem ser analisadas, a fim de dar maior suporte aos resultados (CROWE; FEINBERG, 2001; STAMATIS, 1995).

Para se conduzir uma FMEA eficientemente, recomenda-se seguir oito passos sistemáticos: definir a finalidade ou as expectativas da avaliação e selecionar a equipe, fazer um diagrama de blocos funcionais (FMEA de sistema e de projeto) ou um fluxograma de processo (FMEA de processo e de serviço), dar prioridades, coletar dados, analisar, apresentar resultados, confirmar e avaliar os resultados e realizar tudo novamente (STAMATIS, 1995).

Desse modo, a FMEA é capaz de identificar muitas exigências especificadas e não especificadas do consumidor que se relacionam com o projeto do produto, seu uso, como as falhas podem ocorrer, a severidade de tais falhas, assim como a probabilidade de sua ocorrência. A Figura 22 apresenta o procedimento geral para se realizar a FMEA, que normalmente é feita em duas fases. A primeira fase consiste em coletar as informações funcionais dos componentes e processo alvo da análise. Ferramentas básicas como sessões de *brainstorming* e diagramas de causa-efeito podem ser utilizadas para determinar a relação entre modos potenciais de falha, seus efeitos e as causas relacionadas a esses modos de falha para cada função analisada. Com tais informações se estima a severidade dos efeitos das falhas, a probabilidade de ocorrência da causa das falhas e de detecção dessas antes de sua ocorrência, tendo em vista as atividades planejadas de validação, verificação e prevenção. Calcula-se então o valor do RPN (*risk priority number*) (PUENTE et al., 2002; STAMATIS, 1995; TENG; HO, 1996).

A segunda fase é realizada quando o valor do RPN ultrapassa o valor desejado e, por isso, ações corretivas ou alterações de projeto são requeridas. As ações corretivas visam a diminuição da probabilidade de não detecção do modo de falha, enquanto as alterações no projeto buscam reduzir a severidade das falhas e a probabilidade de sua ocorrência, sendo esta alternativa utilizada para modos de falha que possuem um alto risco associado a sua ocorrência. Após, realiza-se nova análise dos modos e efeitos de falha, a fim de verificar se o RPN sofreu a redução desejada. Ao final do processo, um relatório deve ser gerado e as modificações requeridas devem estar completas, de modo a reduzir ao mínimo o número de modos potenciais de falhas. Todas essas informações coletadas são melhores analisadas quando dispostas em forma de tabela (formulário), conforme Figura 23 (TENG; HO, 1996).



Figura 22: Procedimento geral de FMEA  
 FONTE: adaptado de Teng e Ho (1996).

PRIMEIRA FASE										SEGUNDA FASE										
Item	função	modos potenciais de falha	efeitos potenciais de falha	severidade (S)	causas potenciais de falha	Ocorrência (O)	Métodos de detecção	Detecção (D)	RPN	Ação recomendada	Indivíduo ou área responsável pela execução	Ação tomada	Resultados da ação							
													S	O	D	RPN				

Figura 23: Formulário FMEA  
 FONTE: adaptado de Stamatís (1995).

O processo de escrever cada componente e suas falhas em linhas e colunas é tedioso e trabalhoso e, por isso, na primeira aplicação da FMEA normalmente a equipe fica desanimada. Porém, quando é preciso realizar uma nova FMEA para um item semelhante, pode-se reutilizar a FMEA anterior como referência, necessitando apenas conferir as falhas listadas no passado e verificar se elas são pertinentes para o item em questão, além de concentrar-se na definição de novas falhas. Desse modo, a FMEA passa a ser tratada como se

fosse um catálogo de falhas em potencial. Além disso, atualmente tem-se a disposição programas de computador que ajudam a executar a FMEA, simplificando assim ainda mais o processo (ROZENFELD et al., 2006; SMITH, 2001).

Um problema surge quando a FMEA é realizada apenas para atender a um requisito de gerar o relatório final e então arquivado, pois nesse caso tem-se um gasto dispendioso de esforço, tempo e dinheiro. Isto porque as informações extraídas da FMEA podem ser utilizadas como ponto de partida para atividades de melhoria do projeto. Informações essenciais para as atividades de manutenção, testes em equipamentos e treinamentos podem ser obtidas diretamente do formulário FMEA, devendo apenas ser dispostas no formato correto. Indiretamente, pode-se ainda derivar da FMEA uma lista de cinco itens críticos que devem ser utilizados para minimizar os riscos existentes. A Figura 24 mostra como cada um desses itens é utilizado e em que momento é gerado. Por esses motivos, a FMEA é também considerada uma técnica de gerenciamento de risco, passando por todas as etapas essenciais, tais como planejamento, avaliação, análise e manipulação (CROWE; FEINBERG, 2001; HECHT, 2003; TENG; HO, 1996).

<i>Descrição</i>	<i>Origem</i>	<i>Utilização</i>
Alta severidade	Severidade	Análises de segurança
Mantenabilidade	Controles atuais	Análises de manutenção
Segurança crítica	Severidade e comentários	Análises de segurança
Disponibilidade crítica	Taxa de falha e análises de manutenção	Disponibilidade operacional
Alto RPN	Ocorrência, severidade e detecção	Esforço de atenuação

Figura 24: Origem e utilização dos itens críticos  
FONTE: adaptado de Hecht (2003).

O ideal é que a informação contida no relatório FMEA sirva como base para o controle estatístico do processo, uma vez que gera planos de controle. Em um plano de controle, a detecção de cada uma das falhas de interesse e seu método de detecção devem ser listados, bem como deve ser realizado o controle do processo, a fim de minimizar a ocorrência de tais falhas. O plano de controle gera também informações sobre a frequência de amostragem e métodos de medição (TENG; HO, 1996).

Segundo Stamatis (1995), existem quatro tipos principais de FMEA: de sistema, de projeto, de processo e de serviço. A FMEA de sistema é utilizada para avaliar as falhas em sistemas nos estágios iniciais de conceituação e projeto. Enfoca as falhas do sistema em

relação às suas funcionalidades e no atendimento das expectativas dos clientes. A FMEA de projeto é usada para avaliar falhas no projeto do produto antes de sua liberação para a manufatura. Define necessidade de alterações no projeto do produto, estabelece prioridades para as ações de melhoria, auxilia nas definições de testes e validação do produto, na identificação de características críticas e na avaliação dos requisitos e alternativas do projeto. A FMEA de processo é utilizada para analisar os processos de manufatura e montagem. Define necessidades de alterações no processo, estabelece prioridades para as ações de melhoria, auxilia na execução do plano de controle do processo e na análise dos processos de manufatura e montagem. A FMEA de serviço, por sua vez, é utilizada para analisar os serviços antes que estes sejam oferecidos ao consumidor. Auxilia na análise do fluxo de trabalho e do sistema e/ou processo, identifica tarefas deficientes, significantes ou críticas e contribui para o desenvolvimento de planos de controle, além de estabelecer prioridades para as ações de melhoria.

Para Teng e Ho (1996), a FMEA de processo tradicionalmente se inicia quando o relatório da FMEA de projeto é finalizado e está disponível. Utilizar esses dois tipos de FMEAs consecutivamente na elaboração da FTA pode colaborar na eliminação dos vazios entre estes, tais como modos de falha desconhecidos e falhas com alta probabilidade de ocorrência. Stamatis (1995) estende a relação entre os tipos de FMEA. Para esse autor, existe uma relação entre a FMEA de sistema, de projeto e de processo ou serviço, de modo que os modos de falha da FMEA de sistema geram todas as informações essenciais para as demais FMEA. Embora os efeitos sejam sempre os mesmos, as causas de falha da FMEA de sistema se tornam os modos de falha da FMEA de projeto, que, por sua vez, gera suas próprias causas de falha que, por fim, se tornarão os modos de falha da FMEA de processo ou de serviço.

### 2.8.1 *Função*

As funções de um item podem ser definidas como as ações normais ou características deste ou pela capacidade de desempenho do item. Deve ser comunicada de modo que seja concisa, exata e fácil de entender. Para facilitar, recomenda-se que todas as funções sejam expressas da mesma maneira, como, por exemplo, um verbo ativo ou um verbo mais um nome (RAUSAND; OIEN, 1996; STAMATIS, 1995).

A identificação das funções dos sistemas consiste de uma descrição textual, contendo a finalidade ou objetivo do item e, se possível, os limites operacionais aceitáveis. Um sistema

pode desempenhar várias funções, mas nem todas elas serão igualmente importantes. Dessa maneira, as funções podem ser classificadas, de acordo com sua importância, como: essencial, auxiliar, protetora, informacional, de interface ou supérflua (Figura 25). Essas classes não são, entretanto, exclusivas, de modo que um item pode ser incluído em mais de uma classe. Funções essenciais são simplesmente a razão pela qual o item é instalado e, freqüentemente, dão o nome ao item. Funções auxiliares são aquelas funções que são requeridas para dar suporte à função essencial. Apesar de serem menos óbvias do que as funções essenciais podem, em muitos casos, ser tão importantes quanto estas. Funções protetoras são aquelas que objetivam proteger pessoas, equipamentos e o meio ambiente de danos e lesões, através da prevenção de eventos acidentais e/ou redução de sua gravidade (segurança), diminuição da poluição gerada durante a operação normal (ambiental) ou diminuição de riscos de contaminação dos produtos durante a operação (higiênica) (RAUSAND; OIEN, 1996; SIQUEIRA, 2005).

As funções informacionais compreendem condições de monitoramento, diferentes tipos de alarmes, entre outros. Funções de interface aplicam a interface entre o item em questão e outros itens, podendo ser ativa ou passiva (quando, por exemplo, o item é suporte ou base para outro item). Funções supérfluas introduzem objetivos desnecessários ao sistema, como, por exemplo, o conforto e a aparência do item (RAUSAND; OIEN, 1996; SIQUEIRA, 2005).

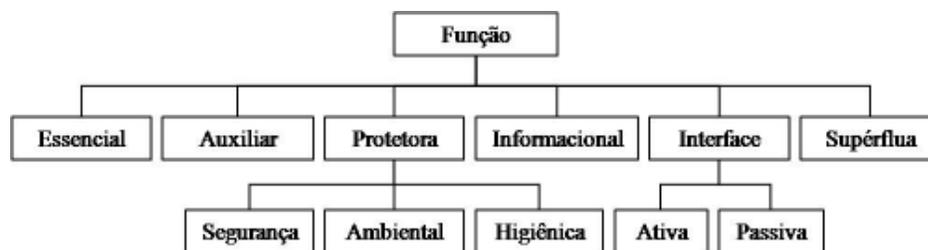


Figura 25: Classificação das funções  
 FONTE: adaptado de Rausand e Oien (1996).

Em geral, os itens podem possuir inúmeros modos operacionais e várias funções para cada modo operacional. Determinar os modos operacionais do item ajuda a identificar tanto funções como modos de falha deste (RAUSAND; OIEN, 1996).

### 2.8.2 *Modo de Falha*

O modo de falha é a descrição física de uma falha, da maneira pela qual ela ocorre. Para se identificar um modo de falha, é preciso estudar as saídas de cada uma das funções. Algumas funções podem ter várias saídas. Os modos de falha podem ser classificados em três categorias principais quando relacionados com a função do item: perda total da função (quando a função não é atingida ou sua qualidade está longe da ideal), perda parcial da função e função errônea (quando o item realiza uma função não requerida, em geral oposta à desejada) (RAUSAND; OIEN, 1996; STAMATIS, 1995).

Rausand e Oien (1996) consideram que os modos de falha devam ser classificados conforme demonstrado na Figura 26. Desse modo, uma falha intermitente é aquela que gera uma falta de alguma função apenas por um período curto de tempo, pois o item reverte a falha e volta a seu estado de operação normal. Uma falha estendida, por sua vez, é aquela que resulta numa falta de uma função que perpetuará até que o item seja substituído ou reparado. Tais falhas podem ainda ser divididas em falhas completas, quando o item não consegue desempenhar nenhuma das funções requeridas, ou parciais, quando resulta na incapacidade do item de desempenhar algumas, mas não todas, funções requeridas (ABNT, 1994; RAUSAND; OIEN, 1996).

Tanto as falhas completas como as parciais podem ainda ser classificadas em falhas repentinas ou graduais. As falhas repentinas são aquelas que não poderiam ser previstas por um exame anterior ou monitoramento. Ao contrário das falhas graduais, que além de serem previstas, podem ser evitadas por ações de manutenção. Tais falhas ocorrem devido a uma mudança gradual com o tempo de dadas características do item. As falhas catastróficas são falhas repentinas, que resultam na incapacidade completa de um item desempenhar todas as funções requeridas. As falhas degradadas são aquelas que são simultaneamente graduais e parciais (ABNT, 1994; RAUSAND; OIEN, 1996).

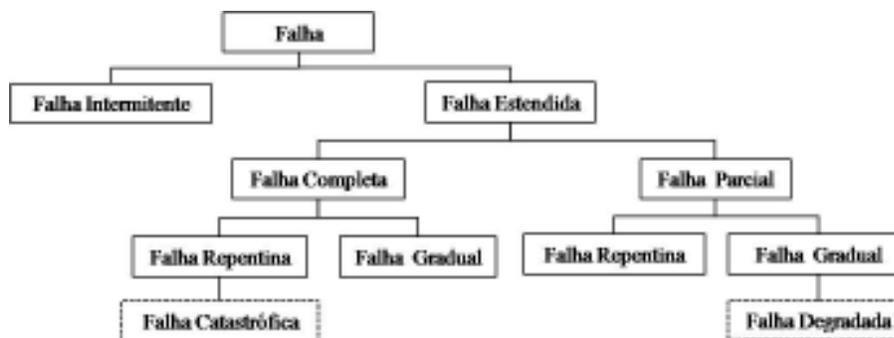


Figura 26: Classificação dos modos de falha  
 FONTE: adaptado de Rausand e Oien (1996).

Os modos de falha mais comumente encontrados são os mecânicos, elétricos, estruturais e humanos. Na área mecânica, são comuns os modos de falha relacionados ao comportamento de materiais usados, tais como fratura, desgaste, deformação e incrustação. Na área elétrica também são comuns vários modos de falha, como perdas (magnética, sobrecarga, dielétrica ou superficial), isolamento e resistência. Na avaliação dos modos de falha estruturais, recomenda-se sua classificação segundo as seguintes fontes: dano acidental, deterioração ambiental ou dano por fadiga. Por fim, os modos de falha relacionados ao comportamento humano podem ser classificados considerando aspectos de atenção (distração), esquecimento (lapso), conhecimento (engano) ou intenção (violação) (SIQUEIRA, 2005).

A maioria dos produtos pode falhar de muitas maneiras diferentes. A análise desses modos de falha pode ser realizada individualmente para cada modo de falha e então os resultados podem ser agrupados, ou em conjunto numa única análise que trata todos os modos de falha conjuntamente. Realizar análises individuais dos modos de falha é vantajoso por ser mais rápido e simples, porém só pode ser realizada quando os modos de falha são independentes e se têm à disposição todos os dados necessários à análise. A análise individual dos modos de falha permite quantificar o impacto de cada modo de falha como se ela fosse a única razão para a falha e avaliar o impacto da confiabilidade do produto com a remoção de cada modo de falha (DOGANAKSOY et al., 2002).

Para facilitar a identificação antecipada dos modos potenciais de falha, Stamatis (1995) sugere três hipóteses: a primeira é pensar na perda da função, ou seja, o contrário do que seria a função do item, a segunda é realizar a pergunta “como o sistema, projeto, componente, subsistema ou processo pode falhar?” e a terceira é utilizar os eventos básicos identificados na FTA.

### 2.8.3 *Efeito de Falha*

O efeito de falha corresponde ao que acontece quando um modo de falha se apresenta quando nenhuma tarefa específica de manutenção é realizada para antecipar, prevenir ou detectar a falha. Sua finalidade é pesquisar os impactos dos modos de falha nas funções do sistema e na instalação e, por conseguinte, suas conseqüências (SIQUEIRA, 2005).

A etapa de determinação dos efeitos de cada modo de falha deve levar em consideração a existência de redundâncias físicas ou funcionais no sistema, uma vez que sua presença pode modificar os efeitos produzidos ou adiar o instante da manifestação dos modos de falha (SIQUEIRA, 2005).

Para identificar os efeitos da falha, normalmente se faz a pergunta “o que acontece ou qual a conseqüência desse problema ou falha?”. Alguns documentos podem ser necessários, tais como: certificados de garantia, reclamações dos consumidores, dados de confiabilidade, estudos de viabilidade, entre outros. As conseqüências podem ser ao nível de sistema, produto, consumidor e/ou leis governamentais. Geralmente, os efeitos da falha são avaliados a partir da perspectiva ou experiência do consumidor (STAMATIS, 1995).

Os efeitos de cada modo de falha podem ser classificados segundo seus níveis de importância (severidade). Isto porque existe uma correlação direta entre efeito e severidade, ou seja, se o efeito for crítico, a severidade será alta e se, por outro lado, o efeito for não crítico, a severidade será baixa. Por definição, severidade corresponde ao impacto gerado por um modo de falha no sistema, podendo ser catastrófico, crítico, marginal ou negligenciável. A Figura 27 mostra a relação entre a severidade e os possíveis danos ambientais, pessoais ou econômicos associados a uma falha e a Tabela 1 ilustra os parâmetros utilizados para determinação do índice de severidade (RAUSAND; OIEN, 1996; SIQUEIRA, 2005; STAMATIS, 1995).

Uma falha produz um efeito catastrófico se dela pode resultar a morte de um ser humano, perdas no sistema (devido a incêndios, explosões ou qualquer outro efeito que produza a indisponibilidade irrecuperável de toda uma instalação ou processo) ou graves danos ao meio ambiente. Um efeito crítico é produzido quando da falha pode decorrer ferimentos ou doenças ocupacionais severas ao ser humano, danos significantes ao sistema ou ao meio ambiente. Um efeito marginal ocorre quando há ferimentos ou doenças ocupacionais leves ao ser humano ou dano de pequeno porte no sistema ou no meio ambiente. Por fim, uma

falha resulta em um efeito negligenciável quando provoca conseqüências reduzidas na operação, demandando recursos econômicos mínimos para restauração à condição original, impactos no meio ambiente insignificantes para infringir qualquer norma ambiental ou quando for insuficiente para causar ferimentos em seres humanos (RAUSAND; OIEN, 1996; SIQUEIRA, 2005).

<i>Severidade</i>	<i>Dano</i>		
	<i>Ambiental</i>	<i>Pessoal</i>	<i>Econômico</i>
Catastrófico	grande	mortal	total
Crítico	significante	grave	parcial
Marginal	leve	leve	leve
Negligenciável	aceitável	insignificante	aceitável

Figura 27: Níveis de severidade do risco  
 FONTE: adaptado de Siqueira (2005).

Tabela 1: Parâmetros para determinação do índice de severidade

<i>Índice</i>	<i>Severidade</i>	<i>Critério</i>
1	nenhuma	Nenhum efeito perceptível.
2	muito pequena	Cliente mal percebe a falha. Efeito muito leve sobre o desempenho do sistema.
3	pequena	Cliente percebe a falha. Mínimo efeito sobre o desempenho do sistema.
4	mínima	Cliente começa a ficar irritado. Pequeno efeito sobre o desempenho do sistema.
5	moderada	Cliente um pouco insatisfeito. Efeito moderado sobre o desempenho do sistema.
6	significativa	Desconforto do cliente. Performance degradada do produto ou sistema. Falha parcial, mas operável.
7	alta	Cliente insatisfeito. Performance do produto ou sistema é gravemente afetada.
8	extrema	Cliente muito insatisfeito. Produto ou sistema inoperável, mas seguro.
9	grave	Efeitos potenciais críticos. Possibilidade de danos físicos aos clientes e complicações com regulamentações governamentais.
10	perigosa	Efeitos críticos e repentinos. Relacionados com a segurança dos clientes (quando há risco de morte) e não conformidade com regulamentações governamentais.

FONTE: adaptado de Stamatis (1995).

#### 2.8.4 *Causa de Falha*

As causas de falha correspondem às circunstâncias durante o projeto, processo ou uso que levaram à falha (Figura 28). Existem duas maneiras pelas quais as falhas podem ser examinadas: como elas se relacionam com falhas específicas ou como elas se relacionam com a curva da banheira (falhas prematuras, casuais ou por desgaste) (RAUSAND; OIEN, 1996; STAMATIS, 1995).

Durante o projeto, podem ocorrer falhas no projeto ou por fragilidade. A primeira ocorre devida à elaboração inadequada do projeto do item e a segunda é devida a uma fragilidade no próprio item, quando submetido a solicitações previstas nas especificações e pode ser tanto inerente como induzida. No processo, as falhas de fabricação ocorrem devido a não conformidade da fabricação com o projeto ou com os processos de fabricação especificados. Durante o uso, podem ocorrer falhas por deterioração, por uso incorreto ou por manuseio. A falha por deterioração é a que resulta de mecanismos de deterioração inerentes ao item e determina uma taxa de falha instantânea crescente ao longo do tempo. A falha por uso incorreto ocorre devido à aplicação de *stress* além dos limites especificados durante o uso, ou ainda por erros de instalação ou operação. A falha por manuseio é causada por manuseio incorreto ou falta de cuidado com o item (ABNT, 1994; RAUSAND; OIEN, 1996).



Figura 28: Classificação das causas de falha  
 FONTE: adaptado de Rausand e Oien (1996).

A relação entre o modo e a causa de falha não é necessariamente linear ou uma para uma, de maneira que se pode ter várias causas para somente um modo de falha. Algumas técnicas tais como *brainstorming*, análises de causa-efeito e diagrama de blocos podem ajudar na identificação das causas de falha. A pergunta básica, nesse caso, é “de que maneira esse sistema pode falhar e continuar exercendo sua função requerida?” ou ainda listar cinco “por que” da ocorrência das falhas (STAMATIS, 1995).

Na FMEA de sistema as causas de falha algumas vezes não são fáceis de obter e, por isso, existem três condições que devem ser examinadas: (i) quando a causa específica é desconhecida, mas existente; (ii) quando a causa específica existe, mas não pode ser detectada; (iii) quando a causa específica existe e pode ser detectada (STAMATIS, 1995).

Associado com as causas de falha tem-se a probabilidade de ocorrência (Tabela 2), visto que essa corresponde ao número estimado de falhas que podem ocorrer para uma determinada causa de falha do item. A atribuição desse índice dependerá do momento em que se está conduzindo a FMEA. Como durante o projeto não se dispõe de dados estatísticos, já que o produto ou processo ainda não existe, a análise deve ser baseada em dados estatísticos

ou relatórios de falhas de componentes ou etapas do processo similares, dados obtidos de fornecedores ou da literatura técnica ou ainda (e em último caso) da opinião de especialistas (pessoas com experiência em projetos, processos, análises, ensaios, etc.). Já se a FMEA estiver sendo feita por ocasião de uma revisão do projeto de um item, é possível a utilização de relatórios de falhas (internos ou de assistência técnica autorizada), históricos de manutenção, gráficos de controle ou outros dados obtidos do controle estatístico do processo, dados obtidos de fornecedores ou da literatura técnica para se estimar a probabilidade de ocorrência. Geralmente, ao se identificar as probabilidades de ocorrência, assume-se que se um item falhar todo o sistema falhará, independente da existência de redundâncias (HELMAN; ANDERY, 1995; STAMATIS, 1995).

Tabela 2: Parâmetros para determinação do índice de ocorrência

<i>Índice</i>	<i>Ocorrência</i>	<i>Critério</i>	<i>Proporção</i>
1	quase nunca	Insucesso improvável. Não há histórico de falhas	1:1.000.000
2	muito remota	Falhas raras	1:20.000
3	remota	Suscetível a muito poucas falhas	1:4.000
4	muito baixa	Suscetível a poucas falhas	1:1000
5	baixa	Falhas ocasionais	1:400
6	moderada	Moderado número de falhas	1:80
7	moderadamente alta	Moderadamente elevado número de insucessos prováveis	1:40
8	alto	Alto número de falhas prováveis	1:20
9	muito alta	Muito alto o número de falhas prováveis	1:8
10	quase certa	Falhas quase certas. Histórico da existência de falhas em projetos semelhantes	1:2

Fonte: adaptado de Stamatis (1995) e Capaldo, Guerrero e Rozenfeld (1999).

### 2.8.5 *Métodos de Detecção de Falha*

Os métodos de detecção das falhas correspondem aos procedimentos, testes e/ou análises de engenharia utilizados com o intuito de identificar as deficiências do projeto o mais cedo possível. O índice de detecção (Tabela 3) é então utilizado para determinar a probabilidade dos métodos de detecção propostos detectarem as causas de um modo específico de falha antes de sua ocorrência (STAMATIS, 1995).

Tabela 3: Parâmetros para determinação do índice de detecção

<i>Índice</i>	<i>Detecção</i>	<i>Critério</i>
1	quase certa	Técnicas conhecidas e comprovadas disponíveis
2	muito alta	Análises de computador disponíveis no início do projeto
3	alta	Uso de simulação e/ou modelagem nas fases iniciais do projeto
4	moderadamente alta	Ensaio em protótipos nas fases iniciais
5	moderada	Ensaio nos itens antes da produção
6	baixa	Ensaio em itens similares
7	muito baixa	Ensaio no produto através de protótipos nas fases finais do projeto
8	remota	Testes de durabilidade nas fases finais do projeto
9	muito remota	Apenas técnicas não confiáveis disponíveis
10	quase impossível	Nenhuma técnica conhecida disponível

Fonte: adaptado de Stamatis (1995).

Portanto, esse índice de detecção indica se a forma de controle é capaz de detectar erros no processo ou produto. É possível classificar o tipo de detecção a ser feita para identificação de falhas em três tipos: utilização de detecção a prova de erro, inspeção com sistema de medição e inspeção visual. Quanto maior for o investimento em tecnologias apropriadas, treinamentos, *poka yokes* ou outras formas de detecção, menor se torna esse índice (BASTOS, 2006).

#### 2.8.6 Avaliação de Risco

Os três elementos que ajudam a definir a priorização das falhas são a ocorrência, a severidade e a detecção. A ocorrência é a frequência com que a falha ocorre, a severidade é a gravidade (efeito) da falha para o ser humano, e a detecção corresponde à habilidade de se detectar a falha antes de sua ocorrência (STAMATIS, 1995).

Há muitas formas de definir o valor desses componentes. O mais usual é a utilização de escalas numéricas. Essas escalas podem ter qualquer valor, não há um padrão especificado para elas. Entretanto, hoje em dia, há duas escalas amplamente utilizadas nas empresas, que são: a escala de 1 a 5 e a escala de 1 a 10. A primeira é limitada por natureza, mas oferece uma fácil interpretação. A segunda é amplamente utilizada e fortemente recomendada porque provê fácil interpretação, exatidão e precisão na quantificação da escala (STAMATIS, 1995).

A prioridade das falhas é realizada através do índice RPN, cujo número corresponde ao produto da ocorrência, severidade e detecção. O valor RPN deve ser utilizado apenas para classificar a prioridade das falhas do sistema. Quando se utiliza a escala 1 a 10 e se considera

um percentual de confiança de 95%, tem-se que valores iguais ou acima de 50 (Eq. 8) devem ser analisados de forma a diminuir o RPN. Esse valor, entretanto, não é obrigatório, podendo variar conforme a confiança e a escala utilizada (STAMATIS, 1995).

$$RPN_{\text{crítico}} \geq (S \times O \times D) - (S \times O \times D \times \text{Confiança}) = (10 \times 10 \times 10) - (10 \times 10 \times 10 \times 0,95) = 50 \quad (8)$$

Esse modo de derivar o RPN já foi criticado por muitos autores. Segundo Gilchrist (1993), o fato de o RPN ser o resultado do produto da ocorrência, severidade e detecção não obedece a nenhuma regra algébrica, uma vez que a probabilidade de ocorrência segue um padrão não linear, enquanto a probabilidade de detecção segue um padrão linear. Além disso, com a escala utilizada, diferentes valores podem ser combinados e dar o mesmo valor de RPN, ainda que a probabilidade da falha atingir o consumidor seja diferente. Esse mesmo autor acrescenta ainda que, do modo como é calculado, o RPN ignora o número de itens que são produzidos. A fim de resolver esses problemas, sugere outra forma de calcular o risco, através da utilização do custo esperado (EC). Esse custo corresponde ao número esperado de falhas que irão atingir o consumidor, e é calculado pelo produto do número de itens produzidos, com as probabilidades de ocorrência e detecção e o custo de cada falha.

Ben-Daya e Raouf (1996) também não concordam com o modo como o RPN é derivado, porém perceberam algumas falhas no modelo proposto por Gilchrist (1993). Entre elas estão que os valores das probabilidades de ocorrência e detecção são muito difíceis de serem estimadas, ainda mais que tais informações não estão disponíveis na fase de projeto (para a qual a FMEA é primordialmente utilizada), além do fato de o novo modelo ignorar completamente a severidade da falha. A partir dessas observações, e levando em consideração que algumas idéias realmente eram interessantes, Ben-Daya e Raouf (1996) propuseram uma forma de melhorar o modelo para o RPN até então disponível. Segundo esses autores, o valor de probabilidade de ocorrência, utilizada no cálculo do RPN, deveria ser transformado para se obter uma relação aproximadamente linear. Isso pode ser conseguido utilizando o fator 2 elevado na potência correspondente à escala. Por exemplo, uma falha que possuísse uma probabilidade de ocorrência alta, tradicionalmente simbolizada por 6, passaria a ser representada por  $2^6$ , e esse valor é que entraria no cálculo do RPN (produto da ocorrência, severidade e detecção).

Tanto Gilchrist (1993) como Ben-Daya e Raouf (1996) concordam que introduzir os custos referentes a uma falha atingir o consumidor no modelo apresenta a vantagem de forçar

as pessoas a pensar nos custos de qualidade e no impacto que as ações corretivas terão, o que aumenta o esforço para sua melhora. Por esse motivo, quando possível, torna-se uma alternativa interessante utilizar em paralelo o modelo de custo esperado.

Outros autores que fazem restrições ao RPN são Sankar e Prabhu (2001) e Puente et al. (2002). Para Sankar e Prabhu (2001), a severidade, probabilidade de ocorrência e de detecção não possui o mesmo peso quando se pensa em risco. Da maneira como é utilizado, é comum que apareçam combinações que apresentam valores de RPN inferiores a outros, mas que são potencialmente mais perigosas. Além do que a escala utilizada (que varia de 1 a 1000), gera algumas interpretações errôneas, tais como que a média de todos os valores de RPN é 500 (quando na verdade é 166), que a mediana encontra-se próximo a 500 (quando é 105) e que há mil possibilidade de valores de RPN (quando há apenas 120). A fim de dar diferentes pesos a cada categoria, esses autores propuseram o RPR (*risk priority rank*), que é baseado no conhecimento de especialistas e originado de regras da forma “se-então”.

Puente et al. (2002), por sua vez, propuseram o RPC (*risk priority category*), a fim de aliviar os mesmos problemas explicitados pelos autores citados anteriormente quanto ao cálculo do RPN. Para esses autores, a decisão deve ter como base regras qualitativas que podem atribuir avaliações de risco, ou categorias, para cada causa potencial de falha. Ou seja, os três índices tratados na metodologia tradicional seriam as variáveis de entrada no sistema de decisão, de modo que seus respectivos valores também teriam sua classe qualitativa correspondente. Foram propostas nove classes, variando de muito baixa (VL) a muito alta (VH) e sua estrutura de decisão é do tipo “se-então”. Todas as regras de decisão são demonstradas através de um gráfico tridimensional.

Outra alternativa para a priorização das falhas no sistema é a utilização da teoria *grey*. Essa teoria foi proposta pelo professor Julong Deng, em 1982, e é utilizada para resolver problemas de incertezas quando se têm à disposição dados discretos e informações incompletas (CHEN; TING, 2002). Chen e Ting (2002) fizeram uso dessa teoria para avaliar a importância de vários fatores na qualidade de serviços prestados e na satisfação dos clientes. Chang, Liu e Wei (2001) demonstraram, por sua vez, o passo a passo e a aplicabilidade dessa técnica através de um exemplo em um sistema de controle para automóveis.

Independentemente da forma como é derivado o RPN, após sua determinação, deve-se iniciar a avaliação baseada na definição de risco. Nenhuma ação é tomada naquelas falhas que estão sob riscos mínimos. Em falhas sob risco moderado, alguma ação pode ser tomada. Em falhas sob alto risco, ações devem ser tomadas. E, quando sob risco crítico, ações serão

tomadas e uma extensiva mudança no sistema, projeto, produto, processo ou serviço será requerido. Em geral, quando há mais de duas falhas com o mesmo RPN, prioriza-se aquela que possui a maior severidade e, em seguida, a menor probabilidade de detecção (STAMATIS, 1995).

Puente et al. (2002) sugerem uma ordem de prioridades para se estabelecer a aplicação das ações corretivas. Primeiramente deve-se procurar eliminar a causa da falha, em seguida, reduzir a frequência ou probabilidade de ocorrência (através da adição de redundâncias no sistema), reduzir a severidade da falha (através do reprojeto) e, por último, aumentar a probabilidade de detecção (aumentando ou melhorando os métodos de detecção existentes). Estes autores salientam, entretanto, que a redução da frequência de ocorrência da falha ou o aumento da probabilidade de detecção desta são medidas preventivas que visam apenas limitar a ocorrência das falhas já existentes e, por isso, devem ser vistas apenas como soluções temporárias.

## 2.9 Aplicações de FMEA

Pickard, Müller e Bertsche (2004) consideram a FMEA a técnica mais orientada ao processo de desenvolvimento de produto (PDP), podendo acompanhar um produto por todo seu ciclo de vida, seguido pelas técnicas de QFD (*Quality Function Deployment*) e FTA (*Fault Tree Analysis*) (Figura 29). A FMEA, porém, não fornece todas as informações necessárias e não incorpora totalmente todas as demais técnicas (Figura 30) e, por isso, a utilização conjunta com outras técnicas pode ser mais vantajosa do que quando se utiliza somente essa técnica isoladamente (PICKARD; MÜLLER; BERTSCHE, 2004).

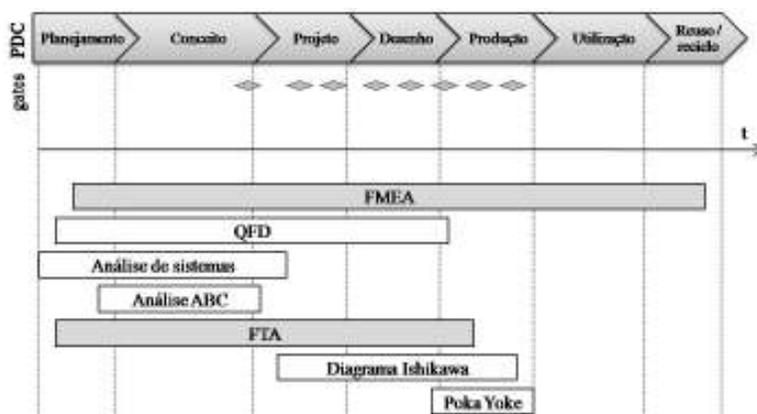


Figura 29: Classificação temporal dos métodos no PDP  
FONTE: adaptado de Pickard, Müller e Bertsche (2004).

A FMEA possui apenas algumas interfaces com o QFD, o que significa que as duas técnicas se apóiam mutuamente, sendo possível derivar algumas informações de uma para outra. Quando aplicadas em conjunto na fase conceitual do PDP, garante-se que a voz do cliente seja desdobrada até os níveis de produto e processo, uma vez que as informações adquiridas na etapa de requisitos do consumidor (QFD) são transformadas e se obtém as especificações funcionais do produto, de onde as funções principais da FMEA podem ser derivadas (GINN et al., 1998; PICKARD; MÜLLER; BERTSCHE, 2004).

Fernandes e Rebelato (2006) propuseram um método de integração entre QFD e FMEA. Para tanto, o QFD foi readaptado de modo a englobar quatro ciclos de relações causa-efeito, obtendo-se assim, através das expectativas dos clientes, os requisitos do sistema, do produto e componentes, do processo e do controle do processo. Esses requisitos tornam-se base para a elaboração da FMEA de sistema, de produto (projeto) e de processo, cujas severidades das falhas são dadas automaticamente pelas importâncias relativas (calculadas) para os requisitos de cada desdobramento QFD.

A FTA, por sua vez, apresenta uma intersecção com a FMEA, ajudando essa na análise de falhas, sendo que sua associação permite investigar as causas com maior qualidade e obter priorizações de forma mais precisa. Não existe uma única forma de interação entre essas duas técnicas de análise de falhas. O uso conjunto resulta num efeito sinérgico, uma vez que uma ferramenta beneficia-se com a utilização da outra. A análise de sistema também apresenta uma intersecção com a FMEA, enquanto que a análise ABC, o diagrama de Ishikawa e o Poka Yoke podem ser completamente integrados e documentados na FMEA (HELMAN; ANDERY, 1995; LIMA; FRANZ; AMARAL, 2006; PICKARD; MÜLLER; BERTSCHE, 2004).

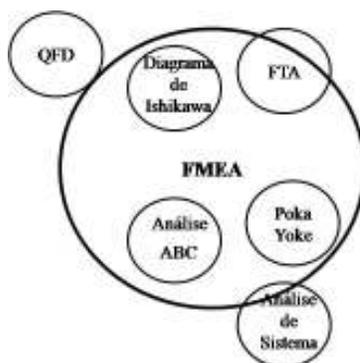


Figura 30: Interfaces e Intersecções da FMEA com outros métodos qualitativos e quantitativos  
 FONTE: adaptado de Pickard, Müller e Bertsche (2004).

A construção civil é uma área em potencial em que a FMEA pode ser aplicada. Autores como Carvalho Jr e Andery (1999) e Silva (2007) utilizaram essa ferramenta, juntamente com a FTA, na melhoria de processos de execução em obras prediais e na avaliação de falhas em um sistema de pontes de embarque de um aeroporto, respectivamente. No primeiro caso, a utilização conjunta das técnicas de FMEA e FTA permitiu a detecção, hierarquização e prevenção de patologias associadas aos procedimentos construtivos, além de estabelecer formas efetivas de parceria entre fornecedores e empresas do ramo. No segundo caso, a utilização da FMEA permitiu a realização da avaliação dos efeitos imediatos e subsequentes de cada um dos modos de falha de cada item pertencente ao sistema pontes de embarque sobre os demais itens. A única ressalva feita pelos autores, nesse caso, decorre da limitação da FMEA de considerar uma falha por vez e, portanto, não permite a combinação das falhas dos componentes com o erro humano cometido pelos operadores, de modo que a FMEA não permite analisar as combinações de falhas que normalmente podem ocorrer nesse sistema.

Mais recentemente, a FMEA tem passado a ser utilizada em setores distintos, tais como na área médica, alimentícia e ambiental. Na área médica, a implementação da FMEA tem possibilitado a diminuição dos custos com ações judiciais e com seguros (para empresa), o que reflete em menores custos para os clientes (planos de saúde) (REID, 2005). Segundo Duwe, Fuchs e Flaschen (2005), nos Estados Unidos, desde 2001, há uma norma que estabelece a realização de pelo menos uma FMEA por ano pelos departamentos chefes de organização de saúde. Para esses autores, a unidade de tratamento intensivo (UTI) possui grande potencial para aplicação dessa técnica, requerendo para tanto uma liderança eficaz e empenho. A FMEA seria, nesse caso, um meio de evitar erros, até mesmo aqueles que tenham ocorrido raramente ou nunca antes no local.

Ainda nessa mesma área, a FMEA pode ser aplicada na melhoria de processos de fabricação de medicamentos. Machado e Melo (2007) fizeram uso dessa ferramenta nesse contexto e descobriram que as principais causas de medicamentos não conformes são devidas à qualidade da matéria-prima. Para os autores, a utilização da FMEA permite que o processo seja melhorado, reduzindo assim o número de produtos não conformes produzidos e, em última análise, os custos. Salientam ainda que essa análise deve ser realizada durante um período de tempo curto, visto que adversidades podem acontecer e provocar alterações num ambiente industrial dinâmico como o de uma indústria farmacêutica.

No setor alimentício, por sua vez, estudos vêm sendo realizados com o intuito de demonstrar os benefícios da utilização conjunta das técnicas de FMEA e APPCC (análise de perigos e pontos críticos de controle). Scipioni et al. (2002), por exemplo, demonstraram que a utilização conjunta dessas técnicas permite com que o processo seja melhor conhecido e entendido e, assim, é possível a obtenção de um aumento na garantia da qualidade dos produtos e a melhora da performance do processo. No estudo realizado, esses autores descobriram que a operação que mais afetava a integridade e segurança dos alimentos para o processo em questão era a de envase. Sugeriram então, a partir dos resultados da FMEA, alterações em toda a documentação da APPCC dessa etapa.

Na área ambiental, autores como Andrade e Turrioni (2000) demonstraram que a FMEA é uma metodologia eficiente para a realização de análises de riscos ambientais. Segundo os autores, isso ocorre porque a FMEA é uma técnica simples, que permite o estabelecimento de prioridades de acordo com os aspectos e impactos ambientais, segundo uma escala de avaliação do seu grau de importância, o que permite, ainda, o estabelecimento direto de medidas preventivas e/ou corretivas quando necessário.

### 3 MÉTODO PROPOSTO

Este capítulo apresenta o método desenvolvido para o cálculo da confiabilidade de sistemas novos, onde muitos dados são imprecisos. O objetivo desse método é desenvolver uma proposta de uso da FMEA como base para uma análise de confiabilidade quantitativa. A intenção de se realizar uma análise quantitativa se deve ao fato de ser mais fácil justificar uma mudança na configuração de um sistema ao apresentar os ganhos de confiabilidade que podem ser obtidos a partir de tais modificações.

A Figura 31 apresenta o método para a determinação da confiabilidade em sistemas novos (ainda em desenvolvimento), o qual está dividido em três fases. A primeira fase contempla o uso da FMEA, que tem o intuito de definir e identificar falhas potenciais do sistema, além de fornecer valores que serão utilizados para determinação dos parâmetros das distribuições de confiabilidade na fase seguinte. A segunda fase corresponde à análise de confiabilidade, envolvendo a conversão de dados qualitativos, com o intuito de realizar a análise quantitativa. A última fase consiste na análise comparativa entre os resultados obtidos nas fases anteriores, com o objetivo de verificar a possibilidade de utilização do modelo. Essas fases são subdivididas em etapas que descrevem as atividades a serem desenvolvidas no intuito de atingir o objetivo proposto pela respectiva fase.

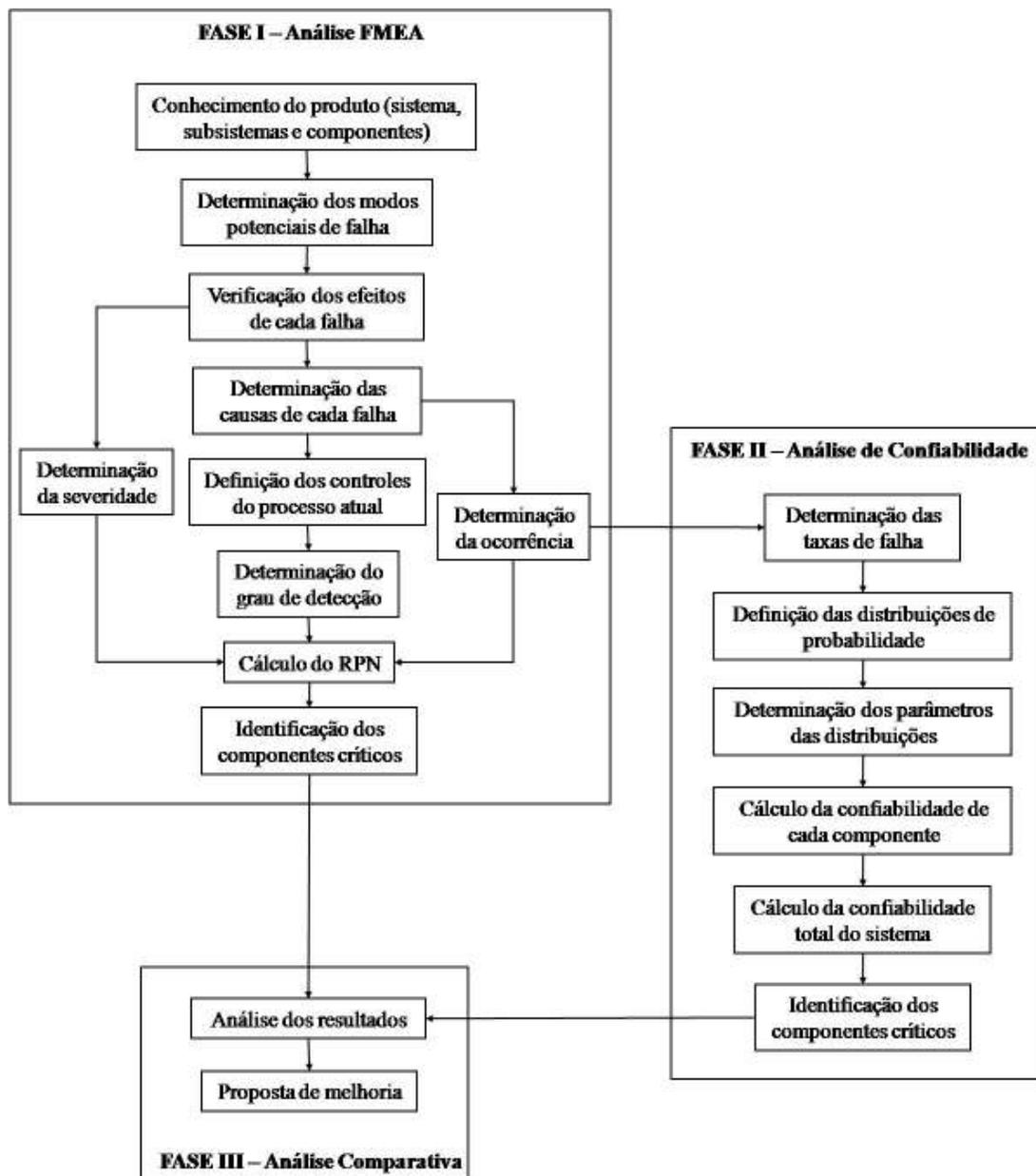


Figura 31: Fases e etapas da metodologia proposta

### 3.1 Análise FMEA

A análise FMEA tem o intuito de definir e identificar falhas potenciais do sistema ainda em seus estágios iniciais de conceituação e projeto. Essa análise deve ser realizada por uma equipe composta de indivíduos provenientes de diferentes áreas e consiste na coleta de informações quanto às funções, modo, causa e efeito das falhas, bem como métodos de detecção e seus respectivos índices. Essas informações coletadas são melhores analisadas

quando dispostas em forma de tabela (formulário) como, por exemplo, o apresentado na Figura 32. As colunas da tabela devem ser preenchidas com as respostas de consenso fornecidas pela equipe multidisciplinar.

<b>Componente</b>	<b>Função</b>	<b>Modo Potencial de Falha</b>	<b>Efeito Potencial de falha</b>	<b>Causa Potencial de Falha</b>	<b>Controles Atuais</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>D</b>	<b>RPN</b>

Figura 32: Cabeçalho do formulário FMEA

Em sistemas novos ainda em desenvolvimento, muitas informações referentes aos componentes desse sistema podem ser desconhecidas. Apesar dessa lacuna de informações, é possível, desde o início do projeto do sistema, realizar análises de confiabilidade com o intuito de aumentar a segurança desse sistema. Nesse caso, o que pode ser feito é a utilização de dados de falhas (ou de confiabilidade) de componentes similares aos que serão utilizados no sistema em desenvolvimento ou ainda utilizar o conhecimento de especialistas.

### 3.1.1 *Conhecimento do produto*

O conhecimento prévio do sistema (produto) é muito importante em qualquer análise de confiabilidade, uma vez que permite o conhecimento da contribuição de cada subsistema e componente no funcionamento do sistema como um todo. Quando o sistema em questão é conhecido, informações podem ser adquiridas através da análise dos manuais técnicos, de operação e de funcionamento dos equipamentos e seus componentes. Outra opção quando se tem à disposição os componentes do sistema é a realização de testes experimentais.

Com o intuito de conhecer o produto em sistemas novos ainda em desenvolvimento, recomenda-se a realização de reuniões periódicas com um grupo selecionado de pessoas com experiência no projeto, fabricação e utilização do produto. A partir das informações obtidas nessas reuniões, é possível conhecer o sistema e seus componentes quanto às suas descrições e funções, bem como elaborar a árvore funcional e o diagrama de blocos do sistema.

### 3.1.2 *Determinação dos modos potenciais de falha*

A determinação dos modos potenciais de falha deve ser realizada através do questionamento aos especialistas de como cada componente do nível mais baixo da árvore de falhas pode falhar, levando-se em consideração a função que desempenha. Assim, para cada função de um componente, é especificado o modo como a falha pode ocorrer. A fim de que nenhum modo de falha seja esquecido, recomenda-se que a equipe de especialistas seja composta por pessoal de diferentes setores, tais como: projeto, manufatura, montagem, qualidade, manutenção, assistência técnica, etc.

### 3.1.3 *Verificação dos efeitos de cada falha e do índice de severidade*

Cada modo de falha pode gerar um ou mais efeitos no sistema. Uma maneira de determinar tais efeitos é pedir aos especialistas para especificar a consequência de cada modo de falha listado anteriormente. Sua finalidade é pesquisar os impactos dos modos de falha nas funções do sistema.

Como os efeitos de cada modo de falha podem ser classificados segundo seus níveis de importância (severidade), nesse momento deve ser realizada a classificação do efeito de cada falha. A severidade é determinada tendo como referência o risco imposto ao cliente em decorrência da falha. A Tabela 1 apresenta um exemplo de parâmetros utilizados para avaliação deste índice.

### 3.1.4 *Determinação das causas de cada falha e do índice de ocorrência*

É possível a existência de várias causas de falha para somente um modo de falha. A fim de determinar tais causas, deve-se pedir aos especialistas que especifiquem os motivos pelos quais o componente pode falhar.

Como se tem associado com as causas de falha a probabilidade de ocorrência destas, nesse momento deve ser atribuído esse índice. Dados de fabricantes de certos componentes também podem ser utilizados com o intuito de complementar (e até mesmo confirmar) as informações obtidas com os especialistas. Na Tabela 2 tem-se uma demonstração dos índices utilizados e seu correspondente significado.

### 3.1.5 *Definição dos controles do processo atual e do grau de detecção de cada falha*

Os métodos de detecção das falhas correspondem aos procedimentos, testes e/ou análises utilizadas com o intuito de identificar as deficiências do projeto o mais cedo possível. É determinada através do questionamento aos especialistas dos controles atuais existentes, ou seja, aqueles controles que já estariam programados para serem realizados depois de concluído o projeto.

A partir desses métodos de detecção, são definidos os índices correspondentes. O índice de detecção é, portanto, utilizado para se determinar a probabilidade de que uma determinada causa de falha seja detectada antes de sua ocorrência. A Tabela 3 apresenta um exemplo de parâmetros utilizados para avaliação desse índice.

### 3.1.6 *Cálculo do RPN*

A determinação do RPN representa a etapa quantitativa do método. Tem por objetivo ajudar no processo de decisão sobre a prioridade a dedicar aos diversos modos de falha presentes no sistema. Seu cálculo é realizado, tradicionalmente, através do produto entre os três índices atribuídos anteriormente (severidade, ocorrência e detecção). Pode ser também calculado por outros métodos, que consistem em variações do primeiro, sendo tentativas de melhoria no valor do resultado obtido. Alguns exemplos desses outros métodos foram discutidos no referencial teórico.

### 3.1.7 *Identificação dos componentes críticos*

Com o intuito de definir itens que requerem planos de ações (itens críticos), alguns critérios devem ser adotados. O principal critério é o valor dos riscos calculados (RPN), podendo ser acrescentado ainda critérios como severidade e probabilidade de ocorrência elevada e/ou índice de detecção baixa.

## 3.2 **Análise de Confiabilidade**

Essa fase tem o objetivo de gerar dados quantitativos para uma análise aprimorada da confiabilidade do sistema a partir de dados qualitativos coletados na fase da análise FMEA.

### 3.2.1 *Determinação das taxas de falhas*

A taxa de falha consiste na probabilidade de ocorrência de falha em um determinado intervalo de tempo. Visto que a probabilidade de ocorrência, obtida previamente através da análise FMEA, corresponde ao número estimado de falhas que podem ocorrer para uma determinada causa de falha do componente, é possível relacionar estas duas variáveis. Assim, a taxa de falha de um componente corresponde, simplesmente, ao somatório dos índices de probabilidade de ocorrência das suas causas de falha.

### 3.2.2 *Definição das distribuições de probabilidade*

A associação de uma distribuição de probabilidade a um conjunto de dados de falha está vinculada, principalmente, à análise de desempenho e às características físicas dos equipamentos/componentes que geraram tais dados.

Quando o sistema em questão é conhecido, essas distribuições podem ser obtidas através da comparação dos dados disponíveis com as distribuições, seja visualmente ou através de testes de aderência. No caso de o projeto do sistema em estudo não estar detalhado, como em projetos em desenvolvimento, a identificação da distribuição de probabilidade deve estar vinculada às características físicas dos componentes que compõem o sistema.

### 3.2.3 *Determinação dos parâmetros das distribuições*

Os parâmetros das distribuições correspondem a um ou mais valores constantes que determinam o formato, a posição e a escala da distribuição. Quando se tem à disposição dados históricos, de garantia, testes de vida, entre outros, esses parâmetros podem ser estimados através de métodos de estimação de parâmetros conhecidos, como, por exemplo, o método dos momentos, o método da máxima verossimilhança e o método dos mínimos quadrados.

Entretanto, em sistemas ainda em desenvolvimento, esses métodos não podem ser utilizados. Assim, opções para se estimar esses parâmetros são: realizar simplificações através de considerações ou elaborar hipóteses e suposições.

### 3.2.4 *Cálculo da confiabilidade de cada componente*

A partir da definição das distribuições de probabilidade que representam os dados de falhas de cada componente, deduz-se a respectiva confiabilidade ( $R(t)$ ) utilizando a equação da função definida para cada caso. Tais equações estão demonstradas na Figura 7, Figura 8, Figura 9 e na Figura 11 presentes no referencial teórico.

### 3.2.5 *Cálculo da confiabilidade total do sistema*

Como a confiabilidade de um sistema depende da forma como os seus componentes estão interconectados, para o cálculo da confiabilidade total do sistema ( $R_s(t)$ ), deve-se primeiramente verificar a forma como cada componente está vinculado seqüencialmente aos demais componentes dentro de cada subsistema (usualmente série ou paralelo). Essa verificação é feita através da visualização do diagrama de blocos do sistema. Para o cálculo da confiabilidade são utilizadas as equações 6 e 7 fornecidas anteriormente.

### 3.2.6 *Identificação dos componentes críticos*

A partir da análise de confiabilidade de cada componente, é possível identificar aqueles que apresentam maior impacto sobre a confiabilidade total do sistema. Tal impacto pode ser expresso por um índice que reflete a importância do componente dentro da estrutura de funcionamento do sistema.

O índice de impacto para cada componente é obtido a partir da determinação de sua representatividade na confiabilidade total do sistema. Para tanto, primeiramente determina-se o aumento gerado na confiabilidade do sistema ao promover uma melhoria infinitesimal na confiabilidade de cada componente separadamente. Tendo esses valores, atribui-se índice 100 ao componente que apresenta maior impacto sobre a confiabilidade do sistema. Aos demais componentes são atribuídos índices proporcionais ao aumento de confiabilidade promovido pela melhoria do componente em questão.

Desse modo, componentes com baixo índice de impacto são aqueles que não influem significativamente para a melhoria da confiabilidade do sistema e, por outro lado, componentes com alto índice de impacto são aqueles considerados críticos para o sistema e devem receber atenção prioritária quanto à proposição de melhorias.

### 3.3 **Análise comparativa**

Essa fase tem o objetivo de realizar a comparação entre os resultados obtidos através da análise FMEA com os obtidos da análise de confiabilidade, a fim de identificar os componentes que merecem atenção especial no sistema em estudo.

#### 3.3.1 *Análise dos resultados*

Nessa etapa, verificam-se os componentes críticos obtidos pela análise FMEA com os obtidos pela análise de confiabilidade. Tem o objetivo de estabelecer um método padronizado de análise de falhas de modo a obter os reais componentes críticos em um sistema.

Essa combinação de técnica qualitativa e quantitativa auxilia em tal determinação, tendo em vista que diminui as incertezas decorrentes das considerações feitas em ambos os métodos de análise. No primeiro método, a principal lacuna corresponde à etapa de cálculo do RPN e conseqüente identificação dos componentes críticos. Já no segundo, essa lacuna está presente, principalmente, nas considerações feitas com o intuito de estimar os parâmetros das distribuições de probabilidade.

#### 3.3.2 *Proposta de melhoria*

A proposta de melhoria consiste em fornecer alternativas para a melhora da confiabilidade do sistema em estudo através da análise isolada de uma falha por vez de cada componente considerado crítico ao sistema. Tem o objetivo de estabelecer ações para diminuir a incidência de falhas, que podem variar desde o estabelecimento de um plano de manutenção preventiva até mesmo a proposta de alteração no projeto do sistema.

## 4 APLICAÇÃO PRÁTICA

### 4.1 Análise FMEA

Apesar de não existirem dados históricos de falhas, devido à experiência e conhecimento dos especialistas, foi possível realizar a análise FMEA, identificando as falhas mais propícias a ocorrerem no sistema em desenvolvimento. À medida que as estimativas de taxas de falhas eram coletadas junto aos especialistas, estas eram dispostas na tabela FMEA, a fim de facilitar a compreensão e melhorar a organização do estudo. Pequenas partes dessa tabela estão mostradas no decorrer do presente capítulo. A versão completa da FMEA encontra-se no Apêndice A. Alguns dados apresentados no decorrer do trabalho foram modificados com o intuito de manter o sigilo das informações.

#### 4.1.1 *Conhecimento do produto*

Com o intuito de conhecer o sistema em estudo, foram realizadas reuniões periódicas com um grupo selecionado de pessoas com experiência no projeto, fabricação e utilização do produto. Grande parte destas pessoas era da área da engenharia (mecânica, elétrica e de produção). No primeiro momento, foram coletadas informações gerais sobre o sistema, os subsistemas e os componentes, tais como definições, descrições e funções.

Visto que o objetivo do estudo é demonstrar a aplicação da metodologia proposta, nesse momento optou-se pela realização da pesquisa em apenas uma parte de um sistema automatizado de transporte de passageiros (denominado Aeromovel), parte essa considerada essencial na definição da confiabilidade total do produto, que corresponde aos sistemas de propulsão e de controle.

O Aeromovel é um meio automatizado de transporte urbano de passageiros que opera sobre uma via elevada, sem interferência com o tráfego da superfície. Adota um sistema pneumático de propulsão do veículo, viabilizada por um fluxo de ar de baixa pressão e alta vazão, operado a partir de unidades geradoras estacionárias. Os sistemas que compõem o Aeromovel são: (i) via; (ii) veículo; (iii) sistema de propulsão; e (iv) sistema de controle. A Figura 33 apresenta uma configuração típica de veículo (AEROMOVEL, 2008).



Figura 33: Veículo  
Fonte: Aeromovel (2008).

O sistema de propulsão, constituído de ventiladores estacionários, é responsável pela movimentação do veículo na via. Esses ventiladores encontram-se usualmente posicionados próximos às estações de embarque do Aeromovel e são comandados da estação ou do centro de controle. Os ventiladores são conectados ao duto de ar formado pela via, fornecendo o necessário fluxo de ar pressurizado, o qual é dosado conforme a velocidade e aceleração requeridas. A pressão de ar atua sobre placas de propulsão fixas ao veículo que se deslocam dentro do duto da via, resultando no empuxo de propulsão (Figura 34). O Aeromovel funciona tanto com pressão como com sucção de ar, empurrando ou puxando o veículo, respectivamente, ou ambos. O principal sistema de frenagem do Aeromovel é baseado nesse sistema (AEROMOVEL, 2008).

As unidades de propulsão são estacionárias e localizadas junto às estações de passageiros. A propulsão é projetada para atender o desempenho previsto em cada aplicação, de aceleração e velocidade. A propulsão está dimensionada para cada trecho entre duas estações.

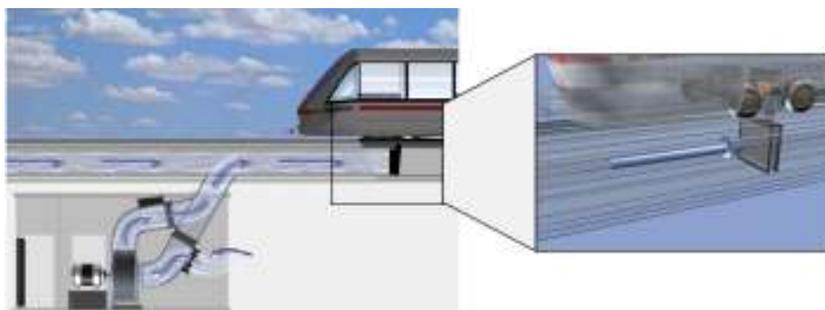


Figura 34: Sistema de propulsão  
Fonte: Aeromovel (2008).

O sistema de controle, por possuir sua parte ativa localizada fora do veículo, permite a operação remota do veículo a partir de uma cabine de comando localizada na estação. O

sistema de controle é baseado na tecnologia de controladores programáveis modulares de alta confiabilidade, permitindo ajustar os parâmetros operacionais, tais como velocidade, aceleração, frota de veículos, entre outros (AEROMOVEL, 2008).

A função desse sistema é assegurar a completa automação da operação do sistema de transporte, que requer interface com a maioria dos elementos ativos do sistema. Além disso, o sistema de controle exerce as funções de sensoriamento, monitoramento e supervisão do sistema de transporte. Na Figura 38 são apresentados os elementos do sistema de controle e de propulsão do Aeromovel através de um croqui. Para a elaboração desse croqui, foi considerada a existência de um bloco de controle padrão, constituído pelos seguintes elementos principais: (i) veículo; (ii) central de comunicação; (iii) unidade de propulsão 1; (iv) unidade de propulsão 2; e (v) aparelho de mudança de via. Esses quatro elementos principais se comunicam entre si, trocando informações referentes a massa, velocidade, aceleração, posição do veículo, pressão na via, posição das válvulas, rotação do motor, etc.

A partir das informações iniciais obtidas, foi elaborada a árvore funcional dos sistemas de interesse (Figura 35). Cada componente desses sistemas possui uma função específica para o funcionamento do Aeromovel, as quais estão descritas na Figura 36 e na Figura 37.

Por fim, foi elaborado o diagrama de blocos (Figura 39), que permitiu a determinação das conexões existentes entre os componentes dos sistemas, bem como entre os sistemas entre si. Como pode ser observado, os sistemas de controle e de propulsão constituem essencialmente um sistema em série, onde a operação depende de vários componentes. Para assegurar alta confiabilidade em sistemas em série, é necessário manter o sistema tão simples quanto possível e utilizar componentes de alta confiabilidade. Alternativamente, os componentes críticos devem ser identificados e deve ser analisada a possibilidade do uso de redundância onde for possível.

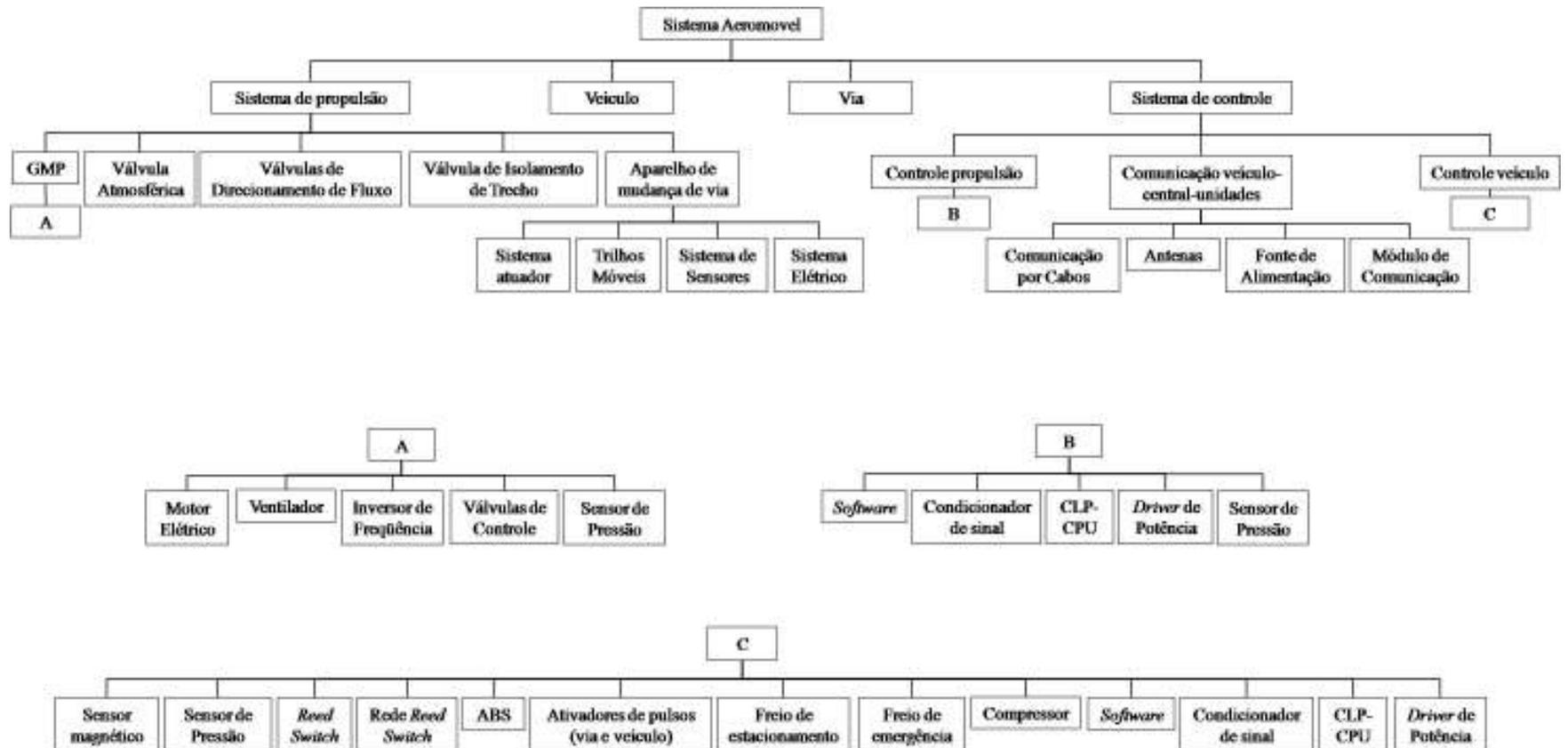


Figura 35: Árvore funcional do sistema Aeromovel

<i>Componente</i>	<i>Descrição</i>
Grupo Moto-Propulsor (GMP)	Principais funções: (i) fornecer fluxo de ar caracterizado por pressão negativa ou positiva; (ii) dar respostas rápidas às mudanças de <i>status</i> ; (iii) cessar a provisão de fluxo de ar, quando solicitado; (iv) conectar o duto da via com a atmosfera, sem produzir fluxo de ar no duto; e (v) executar a função de frenagem pneumática do veículo, conectando o duto com a atmosfera.
Motor elétrico	Composto por um rotor, eixo e acessórios (sensores), tem como objetivo impulsionar o ventilador dentro do GMP.
Ventilador	Ventilador centrífugo, tipo “ <i>limit load</i> ” (potência limitada, isto é, não cresce indefinidamente com o aumento da vazão), pás curvadas para trás, perfiladas, rotor tipo <i>airfoil</i> (pás aerofólicas) que provém alta eficiência energética à máquina. Coordena a propagação do fluxo de ar nos dutos.
Inversor de frequência	Elemento ligado na rede, podendo ser monofásico ou trifásico, e em sua saída há uma carga que necessita de uma frequência diferente da rede. O primeiro estágio é responsável por transformar a tensão alternada em contínua (através de um circuito retificador) e o segundo estágio realiza operação inversa, atendendo assim a frequência desejada pela carga. Tem como objetivo controlar a velocidade do motor de acordo com a maior ou menor necessidade de vazão ou pressão, gerando economia de energia.
Válvulas de controle de fluxo de ar (VC)	Instaladas na via elevada, criando circuitos pneumáticos exclusivos para controle de cada veículo isoladamente, o que proporciona uma separação segura e intrínseca entre veículos. São válvulas que controlam o fluxo de ar gerado pelo GMP, permitindo executar: (i) conexão do duto de propulsão da via para a atmosfera; (ii) fornecimento de fluxo de ar pressurizado positivo ou negativo; (iii) ajuste do fluxo de ar para a operação do veículo; (iv) interrupção do fluxo de ar, fechando parte das válvulas de controle; e (v) execução de dois limites de desvio instalados em cada válvula de controle.
Sensor de pressão	Sensor de membrana que deforma na presença de um gradiente de pressão. Mede a pressão dentro de uma câmara.
Válvula atmosférica (VA)	Válvula do tipo <i>on/off</i> , acionada pneumaticamente por um atuador cilíndrico, a partir da energia armazenada sob a forma de pressão em um reservatório capaz de prover ar suficiente para realizar um grande número de manobras, sem a necessidade de recarga através do compressor (em caso de falha deste). Emprega o conceito de “falha segura”, pois em caso de falta de energia assume, obrigatoriamente, a posição fechada pela ação de uma mola, isolando o duto de ar da atmosfera e cessando automaticamente a movimentação dos veículos em trânsito, pela ação do bloqueio da massa fluidica em compressão.
Válvula de direcionamento de fluxo (VDF)	Assemelha-se à válvula atmosférica, possuindo ainda a função de gerenciar a mudança de direção do veículo.
Válvula de isolamento de trecho (VIT)	Tem como função permitir o isolamento do circuito de propulsão entre dois trechos de via, operando através da obstrução ou não do duto, possibilitando o efetivo controle de um veículo em cada trecho com a(s) respectiva(s) unidade(s) de propulsão.
Aparelho de mudança de via	O aparelho de mudança de via (AMV) permite a passagem do veículo de uma via para a outra através da mudança de posição dos trilhos e da vedação do duto.
Sistema atuador	Consiste em dispositivos do tipo eletromecânico motorizado, hidráulico, pneumático ou combinados. Tem como função posicionar os trilhos e vedar o duto.
Trilhos móveis	Segmentos que adaptam os trilhos à respectiva posição da VDF e encaixam o <i>slot</i> (trilho central) na direção desejada. Segmentos de trilhos móveis são compostos por dobradiças, conexões elétricas e mecânicas, deslizadores, pratos de suporte e direcionamento, elementos de reforço estrutural e outros componentes necessários para o movimento completo de uma VDF para outra.
Sistema de sensores	Instalados na VIT localizada no AMV e em todos os segmentos ou partes móveis dos trilhos e da vedação do duto. Tem como função fornecer sinais correspondentes a cada posição de trabalho prevista para as partes móveis do AMV.
Sistema elétrico	O sistema de alimentação elétrica dos trilhos supre a energia elétrica em corrente alternada ao veículo, utilizando os trilhos como condutores. O sistema compreende um transformador com o respectivo painel de comando e proteção, os trilhos com os respectivos elementos isoladores e pontes de ligação elétrica nas juntas de dilatação dos trilhos.

Figura 36: Descrição dos principais componentes do sistema de propulsão do Aeromovel

<i>Componente</i>	<i>Descrição</i>
Sensor magnético	Mede a variação do campo magnético na proximidade do sensor. É utilizado no sistema para identificar o movimento de giro de um “roda dentada” que permite calcular, através da contagem dos pulsos e da sua relação com o raio da roda, a velocidade translacional do veículo.
<i>Reed Switch</i>	Interruptor elétrico encapsulado em gás inibidor do arco elétrico, acionado pela presença de campo magnético.
ABS	Sistema hidropneumático de acionamento dos discos de freio. Consiste de um sistema que mede as velocidades translacionais nas rodas do veículo e impõe automaticamente uma ação de frenagem diferente em cada roda, de forma a não bloquear completamente o movimento de nenhuma delas evitando, por conseguinte, a derrapagem. O projeto prevê ABS independentes por eixo.
Ativadores de pulso do veículo e da via	Sensores instalados no veículo/via que têm a função de emitir pulsos eletromagnéticos toda vez que se cruzarem. Através da medida do intervalo entre dois pulsos consecutivos, consegue-se estimar a velocidade do veículo (grandezas inversamente proporcionais).
Freio de estacionamento	Modo de operação do sistema de freios de atrito do veículo caracterizado por imobilização em períodos prolongados.
Freio de emergência	Modo de operação do sistema de freios de atrito do veículo caracterizado por: (i) frenagem irreversível em loop aberto até a parada total do veículo na taxa máxima de frenagem, comandada do veículo ou à distância, pelo operador ou pelo sistema de segurança; e (ii) imobilização do veículo em caso de falha.
Compressor	Tem a função de aumentar a pressão de um fluido em estado gasoso (ar).
<i>Software</i>	Programa computacional, um conjunto de procedimentos programáveis que permite a um sistema computadorizado executar automaticamente diferentes e complexas ações.
Condicionador de sinal	Amplifica e condiciona os sinais medidos nas entradas do sistema de processamento de sinais. Executa também ações como isolamento e filtragem, assegurando a imunidade a sobrecargas dos dispositivos de processamento, além de eliminar os ruídos presentes nos sinais medidos.
Controlador CLP-CPU	Conjunto constituído de um controlador lógico programável (CLP) e uma Unidade Central de Processamento (CPU). A CLP consiste em um dispositivo que recebe os sinais de sensores, processa estes sinais através de um algoritmo de controle programado no aparelho e define a ação de controle a ser executada. A CPU é o elemento principal de um sistema de processamento de sinais, constituída pelos elementos físicos necessários ao processamento digital de dados.
<i>Driver</i> de potência	Amplificador de sinal de controle. Transforma o sinal que sai do controlador em sinal de potência para acionamento do atuador.
Rede <i>reed switch</i>	Sensores instalados ao longo da via. Funciona como uma chave que, quando na presença de um campo magnético, fecha ou abre o circuito, gerando um sinal que indica a posição atual do veículo.
Comunicação por cabos	Envio e recebimento de dados entre as estações, realizada através de cabos (de alumínio, cobre, aço ou ligas) que conduzem a energia elétrica.
Antena	Componente primordial para a comunicação em radiofrequência. Tem como função converter sinal elétrico em eletromagnético ou vice-versa.
Fonte de alimentação	Fornecer energia aos módulos de comunicação.
Módulo de comunicação	Enviar e receber dados entre veículos e módulos.

Figura 37: Descrição dos principais componentes do sistema de controle do Aeromovel

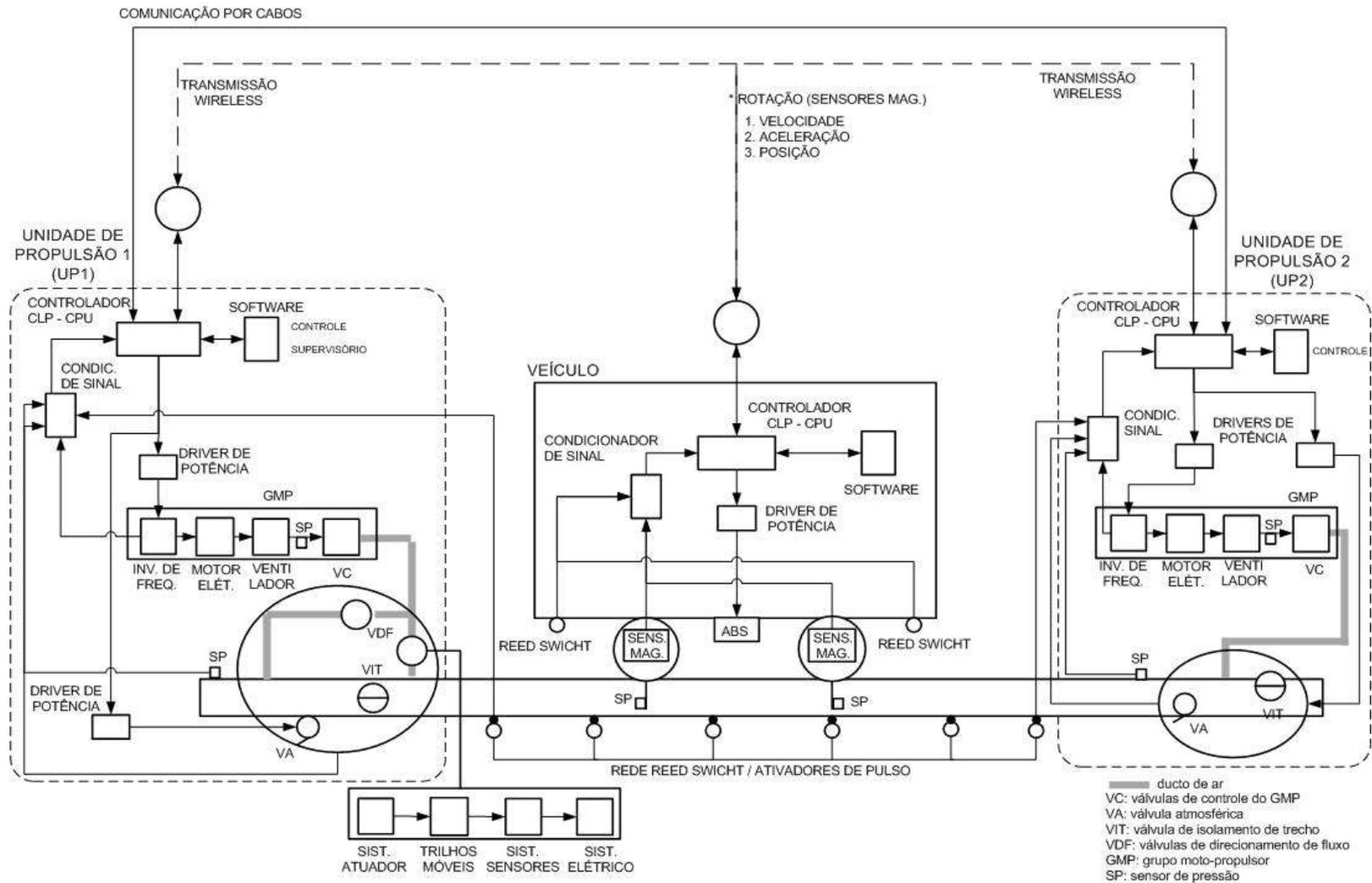


Figura 38: Croqui do sistema de controle e de propulsão do Aeromovel

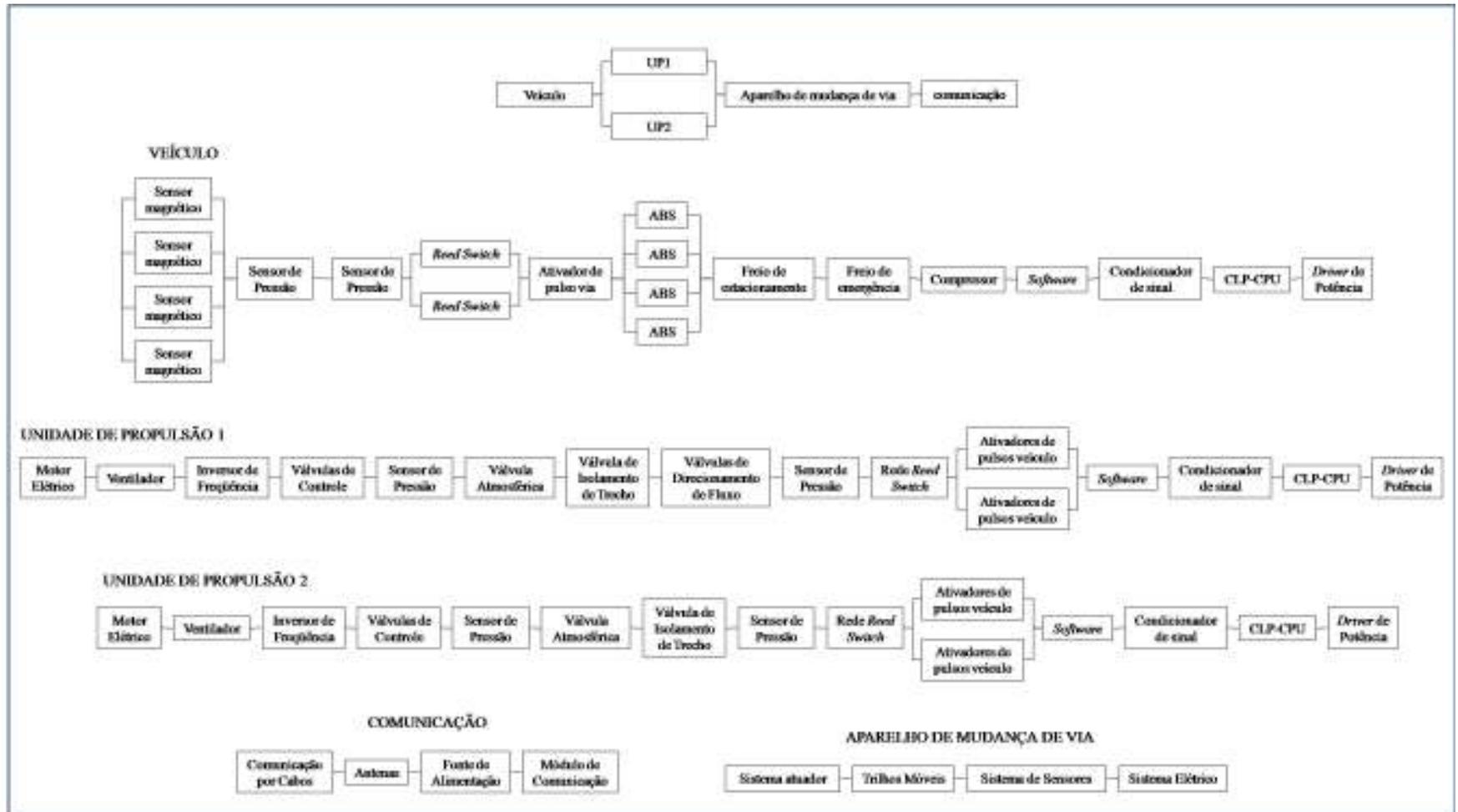


Figura 39: Diagrama de blocos dos sistemas de propulsão e de controle do Aeromovel

#### 4.1.2 *Determinação dos modos potenciais de falha*

No primeiro momento, os componentes do sistema foram agrupados na tabela FMEA levando-se em consideração sua disposição no sistema (conforme o diagrama de blocos previamente elaborado), com o intuito de facilitar a compreensão e posterior preenchimento. Em seguida, foram transcritas as funções de cada componente anteriormente coletada. Os modos de falha foram determinados através do questionamento aos especialistas de como cada componente poderia falhar, levando-se em consideração a função que desempenha.

A Tabela 4 apresenta um exemplo de preenchimento do formulário FMEA quanto ao modo de falha de dois componentes do sistema: freio ABS e ventilador. Analisando essa tabela, pode-se perceber que cada componente pode apresentar mais de um modo potencial de falha.

Tabela 4: Exemplos de modo de falha

<i>Componente</i>	<i>Função</i>	<i>Modo Potencial de Falha</i>
ABS	Frear o veículo suave e precisamente	Falta de frenagem Excesso de frenagem
Ventilador	Prover fluxo de ar	Não prover fluxo de ar

#### 4.1.3 *Verificação dos efeitos de cada falha e do índice de severidade*

Em seguida, foram determinados os efeitos de cada modo de falha previamente determinado e do respectivo índice de severidade que apresentam. A fim de manter uma uniformidade, antes de cada reunião foi mostrada ao grupo de especialistas a tabela do índice de severidade, bem como seus significados e, sempre que necessário, explicadas a definição de modo e efeito de falha. Os índices utilizados no estudo são os mesmos apresentados na Tabela 1.

A Tabela 5 apresenta um exemplo de efeito e severidade da falha para o modo de falha de dois componentes: freio ABS e ventilador. Analisando essa tabela, pode-se perceber que cada modo de falha pode apresentar mais de um efeito potencial de falha possível, mas cada efeito potencial de falha apresenta um único índice de severidade. É importante ressaltar que os efeitos das falhas descritos representam apenas um rol exemplificativo, e não exaustivo, uma vez que se optou por desenvolver apenas aqueles efeitos de falha mais importantes, ou seja, aqueles cujas conseqüências seriam as mais desastrosas para o sistema.

Tabela 5: Exemplos de efeitos da falha e índice de severidade

<i>Componente</i>	<i>Modo Potencial de Falha</i>	<i>Efeito Potencial de falha</i>	<i>S</i>
ABS	Falta de frenagem	Colisão na VIT	10
	Excesso de frenagem	Danos físicos nos passageiros	10
Ventilador	Não prover fluxo de ar	Queda no desempenho do sistema	5
		Acidente	10

#### 4.1.4 *Determinação das causas de cada falha e do índice de ocorrência*

A fim de determinar as causas de cada modo de falha listado, pediu-se aos especialistas que especificassem as maneiras pelas quais o componente poderia falhar, assim como a probabilidade de ocorrência de cada uma delas através da determinação do índice de ocorrência. Dados de fabricantes de certos componentes também foram utilizados com o intuito de complementar (e até mesmo confirmar) as informações obtidas com os especialistas, além de dados provenientes de relatórios de sistemas semelhantes já em operação. A fim de manter uma uniformidade, antes de cada reunião foi mostrada ao grupo a tabela do índice de ocorrência, bem como seus significados e, sempre que necessário, explicadas a definição de modo e causa de falha. Os índices utilizados no estudo são os mesmos apresentados na Tabela 2.

A Tabela 6 apresenta um exemplo de causa e probabilidade de ocorrência para o modo de falha de dois componentes: freio ABS e ventilador. Nesse caso, pode-se perceber que, para cada modo potencial de falha, é possível a existência de mais de uma causa potencial de falha, sendo essencial a listagem do maior número possível de causas existentes, a fim de esgotar as possibilidades e auxiliar em um futuro plano de melhoria. A cada causa de falha está associada uma única probabilidade de ocorrência.

Tabela 6: Exemplos de causas de falha e índice de ocorrência

<i>Componente</i>	<i>Modo Potencial de Falha</i>	<i>Causa Potencial de falha</i>	<i>O</i>
ABS	Falta de frenagem	Falha mecânica	3
		Falha de controle	2
	Excesso de frenagem	Falha mecânica	3
		Falha de controle	2
Ventilador	Não prover fluxo de ar	Falha mecânica	1
		Má instalação do ventilador	1

#### 4.1.5 *Definição dos controles do processo atual e do grau de detecção de cada falha*

Os métodos de detecção foram determinados através do questionamento aos especialistas dos controles que já estariam programados para serem realizados depois de concluído o projeto. Em seguida, foram estabelecidos, também, os respectivos índices de detecção, que correspondem à probabilidade de que uma determinada causa de falha seja detectada antes de sua ocorrência.

Nesse caso, também foi mostrada ao grupo de especialistas a tabela do índice de detecção, bem como seus significados antes de cada reunião, sempre com o intuito de manter uniformidade nos dados. Os índices utilizados no estudo são os mesmos apresentados na Tabela 3.

A Tabela 7 apresenta um exemplo de controles atuais e índice de detecção para as causas de falha de dois componentes: freio ABS e ventilador. Entre os controles atuais mais citados estão o programa de manutenção preventiva e o programa de comissionamento. O primeiro refere-se à capacidade de antecipação aos problemas (falhas), reparando-os antes de sua ocorrência, enquanto que o segundo refere-se aos cuidados durante a implantação do sistema, bem como aos testes iniciais, objetivando realizar os ajustes necessários no sistema antes do início de sua operação. A cada causa de falha está associado um único índice de detecção, sendo que este leva em consideração os controles atuais existentes no projeto.

Tabela 7: Exemplos de controles atuais e índice de detecção

<i>Componente</i>	<i>Causa Potencial de falha</i>	<i>Controles atuais</i>	<i>D</i>
ABS	Falha mecânica	Programa de comissionamento, Programa de manutenção preventiva	2
	Falha de controle	Programa de comissionamento, circuito supervisorio ( <i>watch dog</i> )	5
Ventilador	Falha mecânica	Qualidade dos componentes, Programa de comissionamento, Programa de manutenção preventiva	1
	Má instalação do ventilador	Programa de comissionamento	1

#### 4.1.6 *Cálculo do RPN*

O RPN é calculado através do produto dos índices de severidade, ocorrência e detecção. A Tabela 8 apresenta um exemplo de cálculo do RPN para dois componentes do sistema (freio ABS e ventilador).

Tabela 8: Exemplos de cálculo do RPN

<i>Componente</i>	<i>Modo Potencial de Falha</i>	<i>Causa Potencial de falha</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>D</i>	<i>RPN</i>
ABS	Falta de frenagem	Falha mecânica	10	3	2	60
		Falha de controle	10	2	5	100
	Excesso de frenagem	Falha mecânica	10	3	2	60
		Falha de controle	10	2	5	100
Ventilador	Não prover fluxo de ar	Falha mecânica	5	1	1	5
		Má instalação	5	1	1	5
		Falha mecânica	10	1	1	10
		Má instalação	10	1	1	10

#### 4.1.7 *Identificação dos componentes críticos*

Com o intuito de definir componentes que requerem planos de ações (itens críticos), foram adotados critérios que buscaram analisar componentes com expressivo valor de risco calculado, assim como as falhas com elevados índices de severidade, de probabilidade de ocorrência e com menores probabilidades de detecção. Tais critérios foram definidos a partir do agrupamento de todas as causas de falha do sistema da seguinte maneira: (i) risco associado maior ou igual a 50 (segundo critérios definidos por Stamatis, 1995); ou (ii) severidade alta à perigosa (maior ou igual a 7); ou (iii) ocorrência de moderada à quase certa (maior ou igual a 6); ou (iv) probabilidade de detecção de muito baixa à quase impossível (maior ou igual a 7).

A partir dessas condições, foi elaborada uma tabela que apresenta os componentes dos sistemas de propulsão e de controle do Aeromovel, discriminados por suas causas de falha, considerados prioritários para o funcionamento e segurança do sistema. Essa tabela pode ser encontrada no Apêndice B. A Figura 40 apresenta uma síntese da tabela, apresentando os componentes críticos encontrados pela análise FMEA.

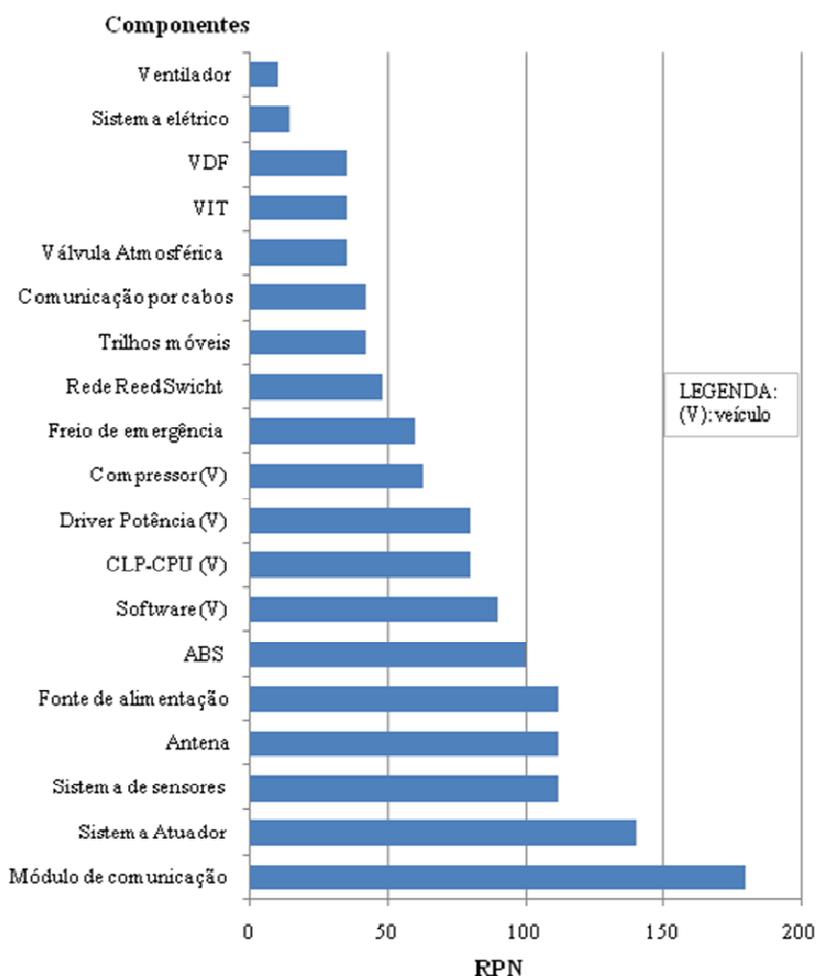


Figura 40: Componentes críticos dos sistemas de controle e de propulsão pela análise FMEA

## 4.2 Análise de Confiabilidade

### 4.2.1 Determinação das taxas de falhas

As taxas de falha associadas ao modo potencial de falha de cada componente do sistema foram obtidas a partir dos índices de ocorrência de falha apontados pelos especialistas durante aplicação da FMEA. A Tabela 2 apresenta a relação entre o índice de ocorrência e a respectiva taxa de falha (proporção) a ser considerada para análise.

Para obter a taxa de falha de cada componente do sistema ( $h_i(t)$ ), considerou-se a soma de todas as taxas de falha associadas ao modo de falha deste componente, conforme demonstrado na Eq. 9. Nessa equação,  $n$  representa o número total de causas de falha do

componente. O MTBF (tempo médio entre falhas) foi considerado como sendo o inverso desse valor, sendo sua unidade de medida o número de viagens realizadas (Eq. 10).

$$h_i(t) = \sum_{i=1}^n \text{Pr } \textit{oporção} \quad (9)$$

$$MTBF = \frac{1}{h_i(t)} \quad (10)$$

A tabela resultante com as taxas de falhas de cada componente pode ser encontrada no Apêndice C. A Tabela 9 apresenta um exemplo de determinação da taxa de falha para um componente do sistema: freio ABS.

Tabela 9: Exemplo de determinação de taxa de falha e MTBF

<i>Componente</i>	<i>Causa Potencial de Falha</i>	<i>O</i>	<i>Proporção</i>	<i>Taxa de Falha</i>	<i>MTBF</i>
ABS	Falha mecânica	3	0,000250	0,00060	1667
	Falha de controle	2	0,000050		
	Falha mecânica	3	0,000250		
	Falha de controle	2	0,000050		

#### 4.2.2 *Definição das distribuições de probabilidade de falha*

No sistema Aeromovel, a identificação da distribuição de probabilidade dos tempos de falha está vinculada especificamente às características físicas de cada componente, dado que o projeto do sistema em estudo ainda não está detalhado e os dados de desempenho são preliminares, correspondendo a componentes genéricos de cada categoria.

Dado as características do sistema em estudo, a distribuição de Weibull foi escolhida para auxiliar na modelagem dos dados. Esse tipo de distribuição é muito útil em uma variedade de aplicações, especialmente como modelo para dados de falha com características de componentes elétricos, mecânicos e eletromecânicos, características estas predominantes nos componentes do sistema Aeromovel. A distribuição de Weibull é flexível para realizar um ajuste de dados. No caso das características de componentes elétricos, a distribuição exponencial é a mais adequada para modelar dados de falha, porém essa distribuição é um caso particular da distribuição de Weibull.

#### 4.2.3 *Determinação dos parâmetros das distribuições*

Uma distribuição de Weibull apresenta três parâmetros de caracterização, quais sejam: o parâmetro de forma ( $\beta$ ); o parâmetro de escala ( $\eta$ ); e o parâmetro de localização ( $\gamma$ ). Os três parâmetros permitem dimensionar a estrutura dos dados de falha relativamente à distribuição dos dados no decorrer do tempo (forma), à dispersão desses dados (escala) e ao início de ocorrência de falhas (localização).

A distribuição de Weibull mais comumente aplicada é composta pelos parâmetros  $\beta$ ,  $\eta$  e  $\gamma = 0$ . Essa configuração representa situações em que o componente pode apresentar falhas tão logo o equipamento inicie seu funcionamento; ou seja, em qualquer tempo  $t > 0$ . Quando esse não é o caso, supõe-se que as falhas tenham início em um tempo  $t = \gamma$ , onde  $\gamma$  é definido como parâmetro de localização e representa o início da distribuição dos tempos de falha. Usualmente, esse é o caso de componentes mecânicos, cuja falha somente ocorre após algum tempo de uso (desgaste, fadiga, propagação de trincas).

Os parâmetros de forma ( $\beta$ ) e de localização ( $\gamma$ ) dos componentes do sistema em questão foram definidos a partir das características físicas de cada componente. Seguindo a proposta de Ribeiro (2008), para padronizar a análise de confiabilidade, foram considerados três parâmetros de forma e de localização associados ao tipo de falha predominante do componente, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros de forma dos componentes

<i>Falha Predominante</i>	<i>Parâmetro de forma</i>	<i>Parâmetro de localização</i>
Elétrica (aleatórias)	1,0	Zero
Eletromecânica (combinação de falhas aleatórias e desgaste)	1,5	Zero
Mecânica (desgaste)	2,0	MTBF/2

Para os componentes com características de funcionamento elétricas, pressupôs-se, de acordo com informações existentes na literatura, que a ocorrência de falhas é aleatória, podendo acontecer desde o primeiro momento ( $\gamma = 0$ ) e está associada a uma distribuição exponencial, ou seja,  $\beta = 1$  e  $\eta = 1/\lambda$ . Por decorrência desse pressuposto, a taxa de falha dos componentes com essas características é constante.

Para os componentes com características de funcionamento eletromecânicas ( $\beta = 1,5$ ), o parâmetro de localização  $\gamma$  é igual zero, ou seja, as falhas do componente sob estudo podem

ocorrer tão logo o componente seja colocado em funcionamento ( $t > 0$ ). O parâmetro de escala é obtido através da relação:

$$\eta = 1,1078 \times MTBF \quad (11)$$

O coeficiente 1,1078 representa a relação teórica existente entre o parâmetro de escala  $\eta$  e o MTBF para uma distribuição de Weibull com  $\gamma = 0$  e  $\beta = 1,5$ , tendo sido obtido por simulação em um *software* de confiabilidade.

Para os componentes com características de funcionamento mecânicas ( $\beta = 2$ ), o parâmetro de localização  $\gamma$  precisa ser estimado. Nesse caso, pressupõe-se que o comportamento de falhas não comece imediatamente após o início do funcionamento do componente, mas somente após o uso mais intensivo deste (quando  $t \gg 0$ ). A taxa de falha, nesse caso, apresenta crescimento linear após seu início. Como aproximação foi utilizada:

$$\gamma = MTBF/2 \quad (12)$$

Isso implica considerar que não são esperadas falhas em tempos inferiores à metade do tempo médio até a falha informado pelos especialistas. Feita essa consideração, o parâmetro de escala é obtido através da relação:

$$\eta = 1,1284 \times MTBF/2 \quad (13)$$

O coeficiente 1,1284 representa a relação teórica existente entre o parâmetro de escala  $\eta$  e o MTBF para uma distribuição de Weibull com  $\gamma = MTBF/2$  e  $\beta = 2$ , tendo sido obtido por simulação em um *software* de confiabilidade. A Figura 41 apresenta, no intuito de facilitar a visualização, as curvas típicas da distribuição de Weibull para os três tipos de falhas predominantes no sistema: elétrica, eletromecânica e mecânica.

A Tabela 11 apresenta exemplos dos parâmetros calculados para seis componentes do sistema: sensor magnético, sensor de pressão, ativadores de pulso, *software*, freio ABS e freio de emergência. A tabela completa encontra-se no Apêndice D.

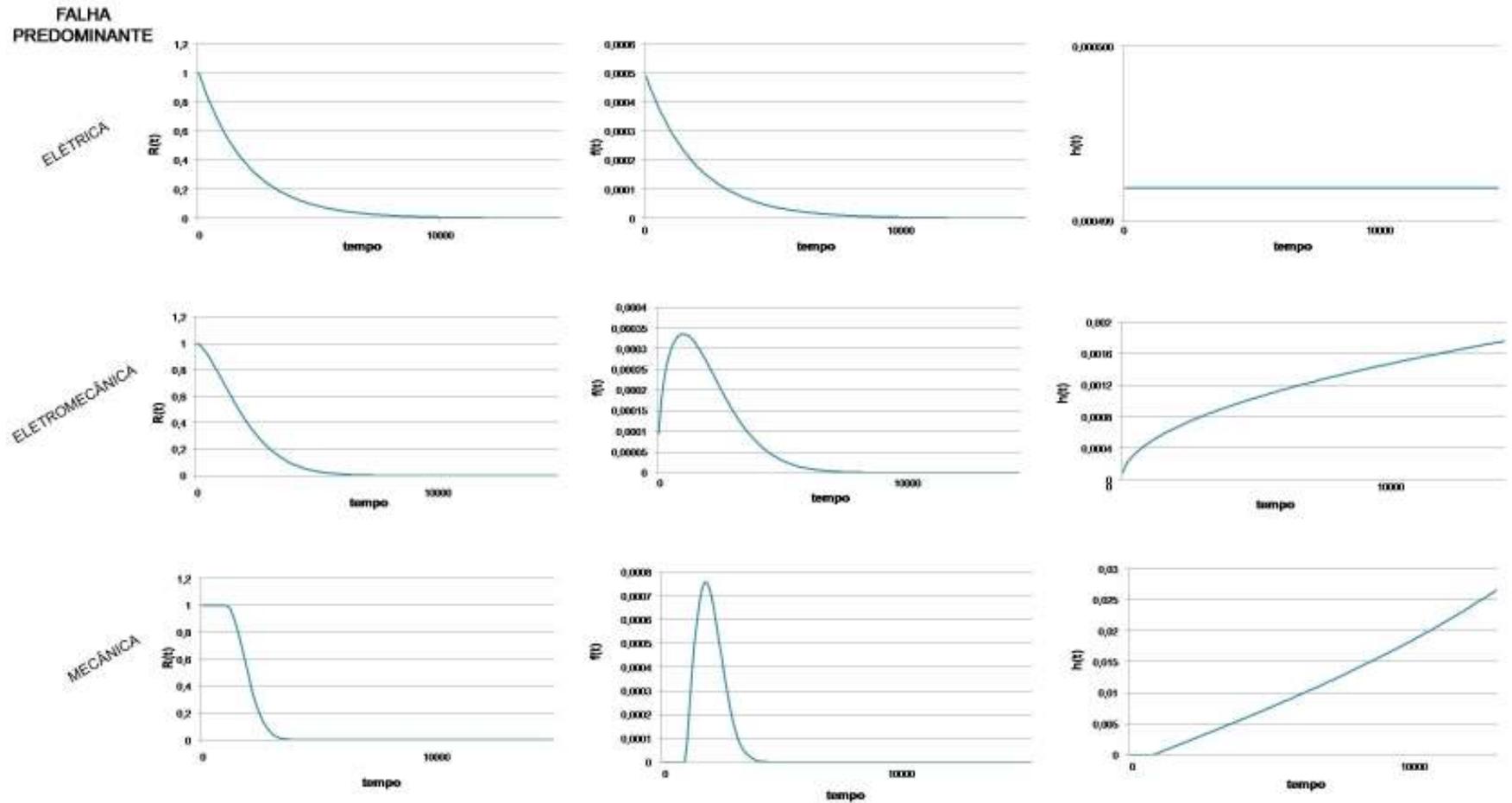


Figura 41: Curvas típicas da distribuição de Weibull para três tipos de falhas

Tabela 11: Exemplo de parâmetros de alguns componentes

<i>Componente</i>	<i>Falha predominante</i>	<i>Taxa de falha</i>	<i>MTBF</i>	<i>Parâmetro de forma (<math>\beta</math>)</i>	<i>Parâmetro de escala (<math>\eta</math>)</i>	<i>Parâmetro de localização (<math>\gamma</math>)</i>
Sensor Magnético	Eletromecânica	0,000124	8033	1,5	8899	0
Sensor Pressão (V)	Eletromecânica	0,002650	377	1,5	418	0
Ativadores de pulsos (V)	Elétrica	0,000350	2857	1,0	2857	0
Software (V)	Elétrica	0,000250	4000	1,0	4000	0
ABS	Mecânica	0,000600	1667	2,0	940	833
Freio de emergência	Mecânica	0,000500	2000	2,0	1128	1000

#### 4.2.4 *Cálculo da confiabilidade de cada componente*

Para a realização das estimativas de confiabilidade, supôs-se que o sistema deve realizar aproximadamente 100 viagens por dia. Além disso, também foi suposto que, ao final de cada dia, o veículo irá sofrer manutenção, caracterizada por inspeção, lubrificação e mesmo substituição de peças onde necessária. Sendo assim, considera-se que as atividades de manutenção recuperam a confiabilidade do sistema ao final de cada dia. A confiabilidade de cada componente foi calculada utilizando-se a fórmula de confiabilidade de Weibull, reproduzida novamente a seguir:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (14)$$

Os valores de confiabilidade obtidos para todos os componentes do sistema ao final de um dia de operação ( $t = 100$ , em que  $t$  representa o número de viagens do veículo) são apresentados no Apêndice D. Na Tabela 12 é apresentada, apenas com o intuito de exemplificar, a confiabilidade de quatro componentes do sistema: sensor de pressão, ativadores de pulso, freio ABS e freio de emergência. Para o aparelho de mudança de via, considerou-se  $t = 1$ , já que o mesmo é acionado apenas uma vez ao dia (retorno do veículo à garagem de manutenção). Observa-se pela tabela que alguns componentes apresentam confiabilidade unitária. Isso ocorre porque o seu parâmetro de localização (início das falhas) é superior a 100 viagens e, portanto, as atividades de manutenção acontecem antes que as falhas por desgaste possam ocorrer.

Tabela 12: Exemplo de confiabilidade de alguns componentes

Componente	Parâmetro de forma ( $\beta$ )	Parâmetro de escala ( $\eta$ )	Parâmetro de localização ( $\gamma$ )	Confiabilidade ( $R(t)$ )
Sensor Pressão (V)	1,5	418	0	0,889587
Ativadores de pulsos (V)	1,0	2857	0	0,965605
ABS	2,0	940	833	1
Freio de emergência	2,0	1128	1000	1

#### 4.2.5 Cálculo da confiabilidade total do sistema

Para o cálculo da confiabilidade total do sistema  $R_s(t)$ , verificaram-se a forma como cada componente está vinculado seqüencialmente aos demais dentro de cada sistema (série ou paralelo) através do diagrama de blocos. Como demonstrado na Figura 39, a maioria dos elementos do sistema Aeromovel está conectada em série, indicando a interdependência entre os elementos para o bom funcionamento do sistema.

A apuração da confiabilidade total do sistema relativamente a um dia de funcionamento do veículo foi realizada utilizando-se as equações 6 e 7 associadas à forma de vinculação entre os elementos do sistema, se em série ou paralelo. Ao final de um dia de operação ( $t = 100$ ), sem a consideração de nenhum tipo de redundância além daquelas inerentes ao sistema, obteve-se uma confiabilidade total para o sistema igual a 53,54%. A Figura 42 mostra a variação da confiabilidade do sistema ao longo de um dia de operação.

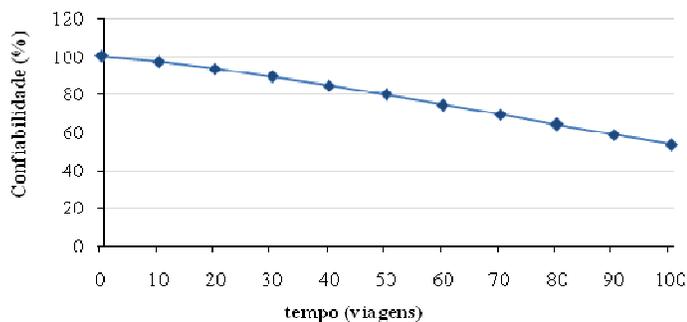


Figura 42: Confiabilidade do sistema ao longo de um dia de operação

Além do cálculo realizado para um dia de funcionamento, a análise foi estendida para toda a vida útil do sistema, bem como de cada um de seus componentes. Para realizar essa análise, foi utilizado um *software* de análise de confiabilidade em sistemas (ProSis). As Figuras 44, 45, 46 e 47 apresentam os gráficos das funções de confiabilidade, distribuição acumulada, densidade de probabilidade e função de risco (taxa de falhas) ao longo do tempo

para o sistema Aeromovel. Importante salientar que esses gráficos representam a confiabilidade do sistema supondo que não sejam feitas as atividades de manutenção.

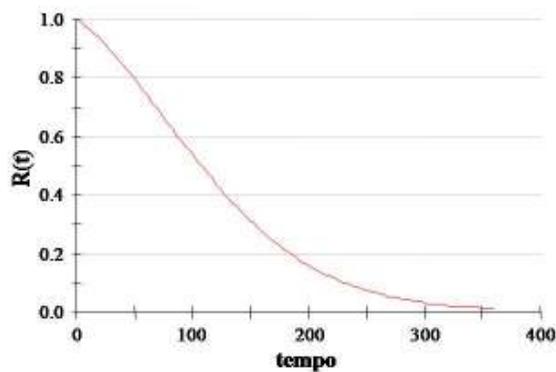


Figura 43: Confiabilidade do sistema ao longo do tempo (viagens)

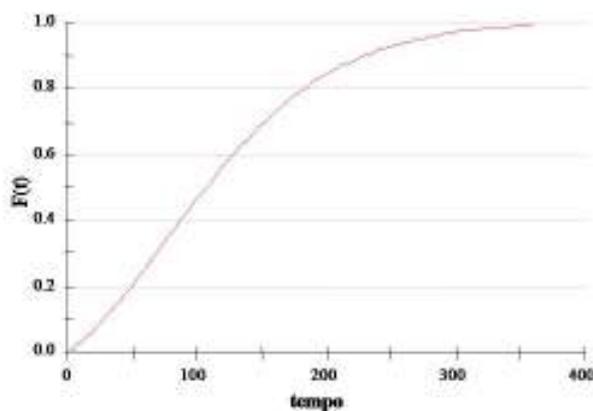


Figura 44: Distribuição acumulada de falhas do sistema ao longo do tempo (viagens)

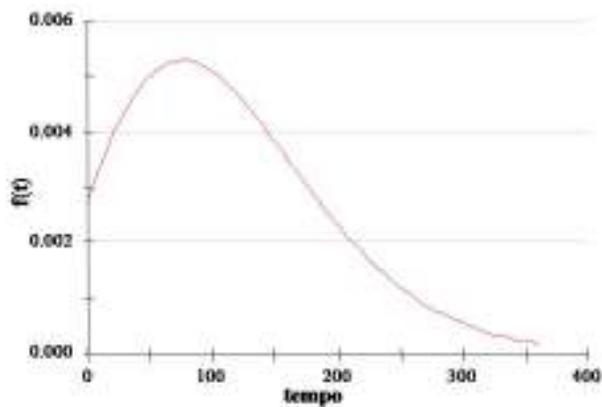


Figura 45: Densidade de probabilidade de falhas do sistema ao longo do tempo (viagens)

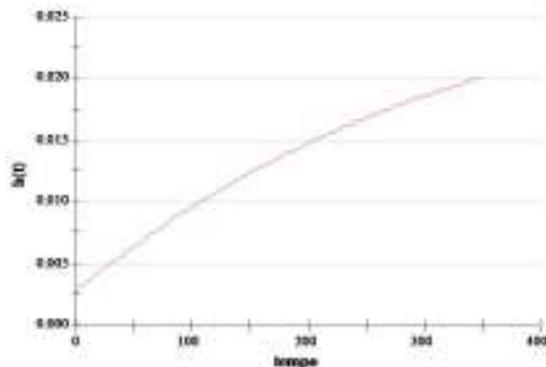


Figura 46: Taxa de falhas do sistema ao longo do tempo (viagens)

#### 4.2.6 Identificação dos componentes críticos

Foram identificados os componentes críticos do sistema através da utilização do índice de impacto. Esse índice indica quanto a melhoria da confiabilidade de um componente influencia na confiabilidade global do sistema. O componente que possui a maior influência recebe a pontuação 100, enquanto que os demais componentes são pontuados proporcionalmente à sua influência. Os resultados estão apresentados na Figura 47.

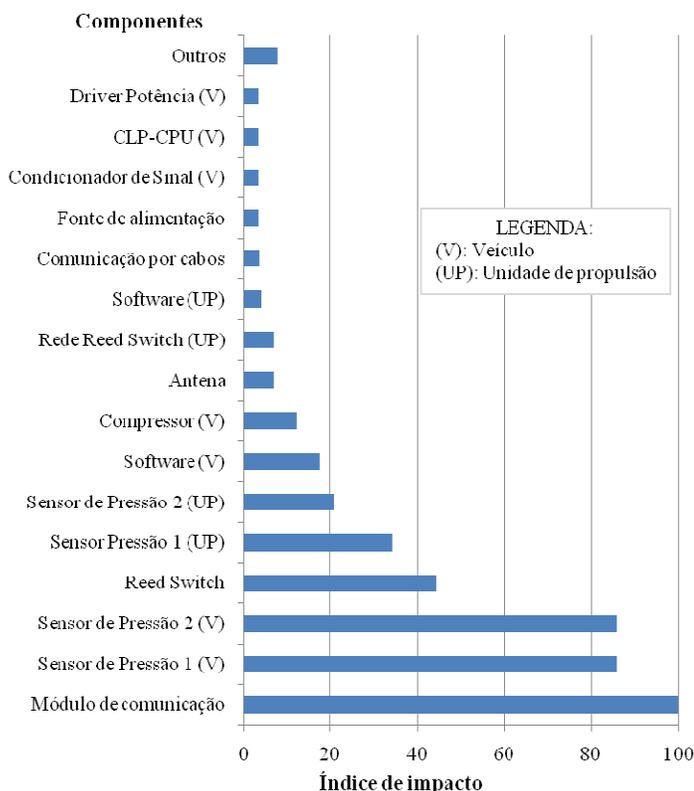


Figura 47: Componentes críticos dos sistemas de controle e de propulsão pela análise de confiabilidade

### 4.3 Análise comparativa

#### 4.3.1 Análise dos resultados

Comparando a Figura 40 com a Figura 47, pode-se perceber que a análise FMEA trouxe como resultado um maior número de componentes considerados críticos ao sistema, aos quais, portanto, deveriam ser enfatizadas as melhorias. Entretanto, essa análise não considera que, por exemplo, os componentes do aparelho de mudança de via (AMV) são utilizados apenas uma vez ao dia. Assim, seria um dispêndio de dinheiro colocar redundância nesses componentes, bastando apenas um programa de manutenção preventiva mais adequado (frequência).

Visto que a primeira técnica (análise FMEA) leva em consideração as informações de cada componente separadamente e que a segunda (análise de confiabilidade) leva em consideração a análise conjunta de tais componentes, a integração dessas duas técnicas resulta numa proposta de melhoria que leva em consideração tanto o risco de cada componente isoladamente como seu impacto conjunto no sistema. A partir dessa análise conjunta é possível definir a melhor maneira de aprimorar a confiabilidade do sistema, tornando-o mais seguro a um menor custo possível.

Assim, com o intuito de integrar as duas técnicas, o que se propôs é um novo cálculo de risco, denominado RPNI, dessa vez considerando, além do índice de severidade, ocorrência e probabilidade de detecção, o índice de impacto também. A Tabela 13 apresenta a nova ordem de classificação obtida dos componentes críticos do sistema. Àqueles componentes que não influem na confiabilidade total do sistema, foi atribuído índice de impacto (I) unitário. A fim de garantir, ao mesmo tempo, uma alta confiabilidade e segurança ao sistema, foram utilizados os seguintes critérios para a classificação de um componente como crítico: (i) RPNI maior ou igual a 50; ou (ii) severidade alta à perigosa (maior ou igual a 7); ou (iii) ocorrência de moderada à quase certa (maior ou igual a 6); ou (iv) probabilidade de detecção de muito baixa à quase impossível (maior ou igual a 7).

Tabela 13: Componentes críticos dos sistemas de controle e de propulsão

<i>Componente</i>	<i>RPN</i>	<i>I (%)</i>	<i>RPNI</i>
Módulo de comunicação	180	100	18000
Sensor Pressão 1 (V)	25	85,8	2145
Sensor Pressão 2 (V)	25	85,8	2145
<i>Software</i> (V)	90	17,5	1575
Sensor Pressão 1 (UP)	25	34,3	858
Antena	112	7	784
Compressor	63	12,3	775
<i>Reed Swicht</i>	12	44,3	532
Sensor Pressão 2 (UP)	25	20,9	523
Fonte de alimentação	112	3,5	392
Rede <i>Reed Swicht</i>	48	6,9	331
CLP-CPU (V)	80	3,5	280
<i>Driver</i> Potência (V)	80	3,5	280
<i>Software</i> (UP)	45	4,3	194
Comunicação por cabos	42	3,7	155
Sistema Atuador	140	1	140
Condicionador de Sinal (V)	40	3,5	140
Sistema de sensores	112	1	112
ABS	100	1	100
Freio de emergência	60	1	60
Trilhos móveis	42	1	42
Válvula Atmosférica	35	1	35
VIT	35	1	35
VDF	35	1	35
Sistema elétrico	14	1	14
Ventilador	10	1	10

Comparando essa tabela com a apresentada no Apêndice B, proveniente da análise FMEA, percebe-se que houve um incremento de componentes a serem considerados prioritários para a segurança e confiabilidade do sistema em estudo.

#### 4.3.2 *Proposta de melhoria*

Mesmo implantando atividades de manutenção que recuperem o sistema ao final de cada dia, a confiabilidade obtida ( $R = 53,54\%$ ) corresponderia, em média, a uma interrupção do serviço a cada dois dias de operação, valor esse considerado muito baixo.

Assim, a partir da constatação dos componentes críticos, buscou-se identificar alternativas de melhorias para a confiabilidade. Importante entender que esse valor não se refere a acidentes, mas a qualquer pequena falha que conduza a interrupção da operação ou mesmo queda no desempenho do sistema. No que concerne a acidentes, o Aeromovel é um

sistema inerentemente muito seguro, uma vez que: (i) o sistema opera em via elevada, tornando atropelamentos muito improváveis; (ii) existe um colchão de ar entre os veículos, tornando colisões muito improváveis; (iii) o sistema de propulsão é constituído de um mastro preso ao duto, tornando o descarrilamento muito improvável; e (iv) o sistema não possui motor ou combustível embarcado, tornando a ocorrência de incêndio muito improvável. Atropelamentos, colisões, descarrilamentos e incêndios são os principais perigos dos sistemas tradicionais sobre trilhos (trens urbanos).

As alternativas de melhorias da confiabilidade podem ocorrer através da redução da taxa de falha do componente original (que depende das características físicas dos componentes e da existência de um programa de manutenção preventiva e/ou de comissionamento mais intenso), ou ainda acrescentando redundâncias de componentes (associações em paralelo) com o intuito de fortalecer a confiabilidade do sistema.

A Figura 48 apresenta os componentes críticos e as respectivas sugestões para melhorar a confiabilidade total do sistema. Componentes que apresentaram índice de impacto unitário foram agrupados, visto que os cuidados que devem ser tomados são semelhantes a todos. Tais componentes são considerados críticos ao sistema essencialmente pelo alto grau de severidade que suas falhas apresentam. Apesar disso, a probabilidade de que tais falhas ocorram são muito pequenas e, portanto, a fim de evitar que venham a ocorrer, basta realizar programas de manutenção preventiva periódicos. Pode-se perceber ainda que componentes que apresentaram índice de impacto superior a 15% foi sugerido a adição de redundâncias, visto que tais componentes são essenciais para a confiabilidade do sistema em questão. Aos demais componentes, a recomendação sugerida foi proposta tendo em vista os tipos de falhas predominantes em cada um.

A Figura 49 apresenta o diagrama de blocos dos sistemas de propulsão e de controle modificados, com a inclusão de redundâncias dos componentes sugeridos para aumento da confiabilidade total dos sistemas. Os componentes ressaltados na figura demonstram as redundâncias acrescentadas nos sistemas, conforme a proposta de melhorias.

<i>Componente</i>	<i>Propostas de melhoria</i>
Módulo de comunicação	Adicionar redundância.
	Investir na qualidade do componente, a fim de diminuir a probabilidade de falhas elétricas.
	Programa de comissionamento reforçado, a fim de diminuir a probabilidade de interferências ou barreiras, além de manutenções preventivas semanais.
Sensores de pressão (V)	Adicionar redundância.
	Manutenção preventiva mais freqüente, a fim de diminuir a probabilidade de rompimento ou entupimento da mangueira.
<i>Software</i> (V)	Adicionar redundância.
Antena	Inspeções visuais mais freqüentes, a fim de diminuir a probabilidade de danos físicos.
Sensores de pressão (UP)	Adicionar redundância.
	Manutenção preventiva mais freqüente, a fim de diminuir a probabilidade de rompimento ou entupimento da mangueira, bem como falhas mecânicas.
<i>Reed switch</i>	Adicionar redundância.
	Programa de comissionamento reforçado, a fim de evitar oscilações bruscas do veículo.
	Manutenção preventiva mais freqüente e inspeções visuais diárias, a fim de diminuir a probabilidade de danos físicos no sensor.
Compressor	Investimento em um compressor de alta confiabilidade, a fim de diminuir a probabilidade de ocorrência de uma falha elétrica ou mecânica.
	Manutenção preventiva mais freqüente, a fim de diminuir a probabilidade de rompimento das mangueiras.
Fonte de Alimentação	Investir na qualidade do componente, a fim de diminuir a probabilidade de falhas elétricas.
Rede <i>Reed Swicht</i>	Programa de comissionamento reforçado, a fim de evitar danos físicos dos sensores em função de mau posicionamento destes.
	Manutenção preventiva mais freqüente, a fim de diminuir a probabilidade de queima dos circuitos, além de inspeções visuais.
CLP-CPU (V)	Adicionar redundância.
<i>Driver</i> Potência (V)	Adicionar redundância.
<i>Software</i> (UP)	Adicionar redundância.
Comunicação por Cabos	Programa de comissionamento reforçado e manutenção preventiva freqüentes.
Condicionador de Sinal (V)	Adicionar redundância.
Sistema atuador, sistema de sensores, sistema elétrico e ventilador	Programa de manutenção preventiva reforçada, a fim de evitar que ocorra uma falha nesse componente.
ABS, freio de emergência, trilhos móveis, VA, VIT e VDF	Manutenção preventiva freqüente, a fim de diminuir a probabilidade de ocorrência de falhas mecânicas.

Figura 48: Propostas de melhorias para o sistema Aeromovel

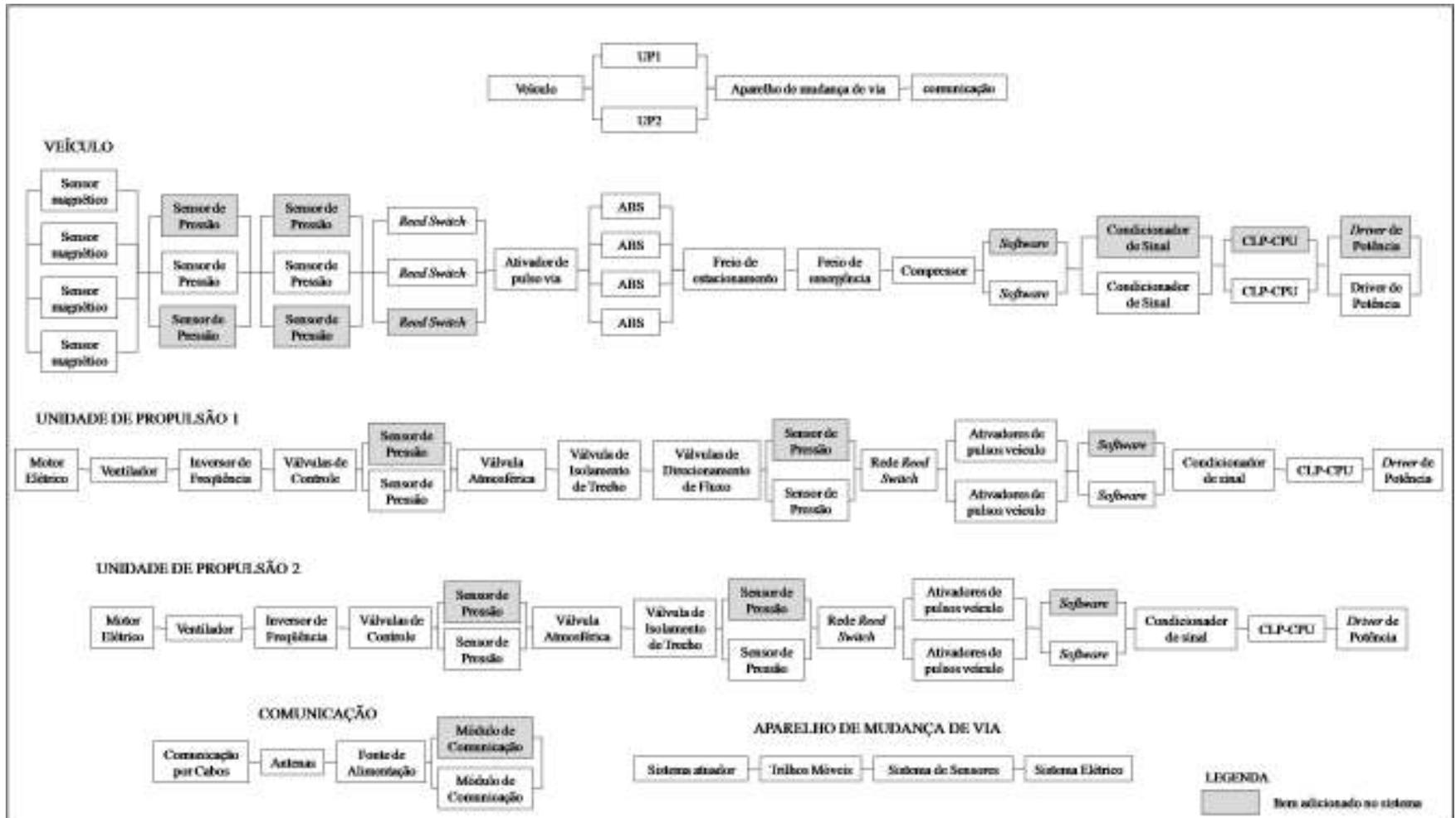


Figura 49: Diagrama de blocos do sistema Aeromovel modificado

A partir das propostas de melhoria, realizou-se um novo cálculo de confiabilidade total para o sistema modificado. Ao final de um dia de operação ( $t = 100$ ), obteve-se que a confiabilidade do sistema Aeromovel modificado é igual a 98,92%. A confiabilidade obtida corresponde, em média, a uma interrupção do serviço a cada cem dias de operação (10.000 viagens), valor esse considerado aceitável. A Figura 50 apresenta a variação da confiabilidade desse sistema modificado ao longo de um dia de operação.

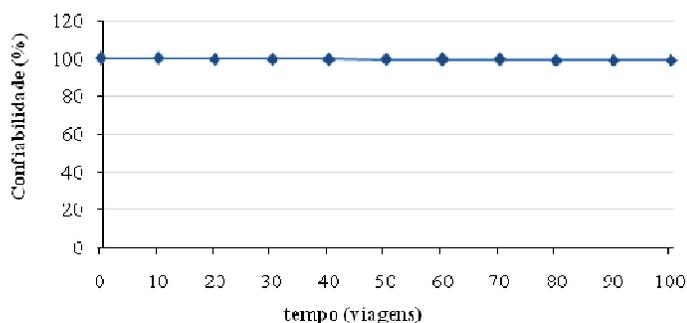


Figura 50: Confiabilidade do sistema modificado ao longo de um dia de operação

Nesse caso também foi possível estender a análise para toda a vida útil do sistema, bem como para cada um de seus componentes, através da utilização do *software* de confiabilidade de sistemas (ProSis). As Figuras 52, 53, 54 e 55 apresentam os gráficos das funções de confiabilidade, distribuição acumulada, densidade de probabilidade e função de risco (taxa de falhas) ao longo do tempo para o sistema modificado. Novamente, esses gráficos ilustram a evolução da confiabilidade para a situação onde não há atividades de manutenção.

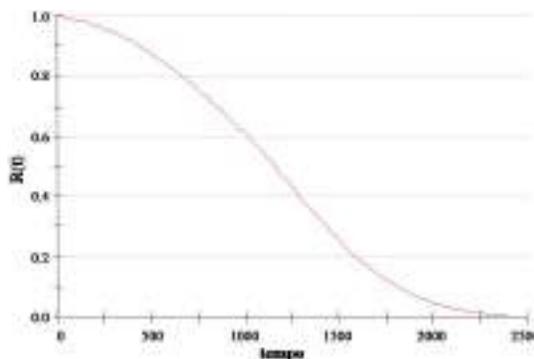


Figura 51: Confiabilidade do sistema modificado ao longo do tempo (viagens)

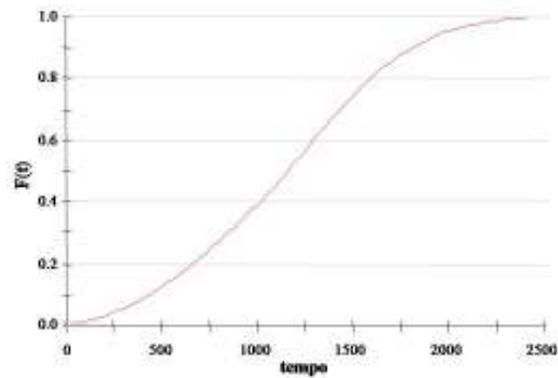


Figura 52: Distribuição acumulada de falhas do sistema modificado ao longo do tempo (viagens)

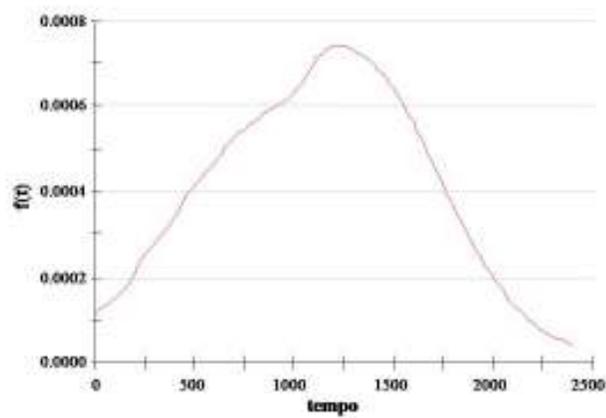


Figura 53: Densidade de probabilidade de falhas do sistema modificado ao longo do tempo (viagens)

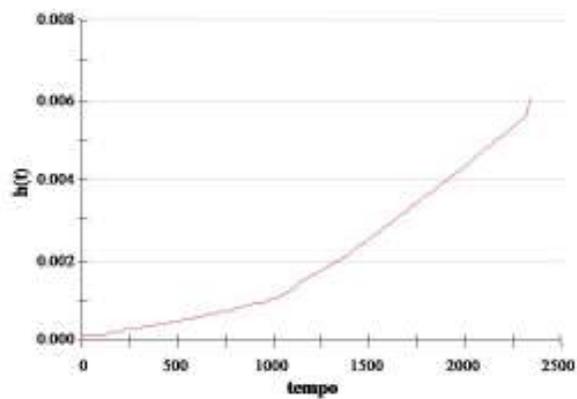


Figura 54: Taxa de falhas do sistema modificado ao longo do tempo (viagens)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas através do desenvolvimento do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1 Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo geral desenvolver uma proposta de uso da FMEA como base para uma análise de confiabilidade quantitativa. Isso porque a utilização de dados obtidos por uma técnica qualitativa (FMEA) para uma análise quantitativa de confiabilidade em um sistema novo em fase de desenvolvimento, gera um método que leva em consideração tanto os aspectos capturados na análise de FMEA como as relações de confiabilidade estabelecidas pelo diagrama de blocos do sistema em estudo.

Tal necessidade surgiu do fato de que em sistemas novos não têm à disposição dados essenciais para uma análise puramente quantitativa. Assim, com o intuito de dar início a uma análise de confiabilidade o mais cedo possível, faz-se necessário o uso de dados qualitativos obtidos preliminarmente. Além disso, a combinação dessas duas técnicas tem como intuito validar os resultados obtidos, já que os resultados de uma técnica servem de base para o emprego da outra técnica, que complementa a primeira, reduzindo fragilidades da adoção exclusiva de uma delas.

Além disso, a análise FMEA não leva em consideração a importância do componente no sistema, mas apenas sua importância isoladamente. Assim sendo, um componente, mesmo sendo considerado crítico pela FMEA, pode não o ser necessariamente para o sistema, visto que pode haver redundâncias ou, ainda, sua utilização pode ser muito pequena. É nesse momento que aparece a importância da análise de confiabilidade, pois ela analisa o conjunto dos componentes, considerando o sistema como um todo. A integração dessas duas técnicas permite definir a melhor maneira de tornar o sistema mais confiável a um menor custo possível, visto que apenas em componentes com um alto RPNI recomenda-se o uso de redundâncias.

A metodologia desenvolvida foi aplicada em dois sistemas do Aeromovel: o sistema de controle e o sistema de propulsão. Tais sistemas estão em fase de desenvolvimento e, portanto, muitas informações referentes aos seus componentes são apenas qualitativas.

Nesse contexto, primeiramente identificaram-se os principais modos de falha dos componentes dos sistemas, quantificou-se sua gravidade, ocorrência e probabilidade de detecção e determinaram-se os componentes críticos dos sistemas através da análise FMEA.

A partir das informações a disposição e realizando algumas considerações, foi possível determinar a confiabilidade de cada componente dos sistemas, bem como do sistema como um todo. Pela análise de confiabilidade foi possível determinar o índice de impacto de cada componente, ou seja, o quanto o componente é relevante para a confiabilidade do sistema em questão.

Com o intuito de integrar as duas técnicas, propôs-se uma nova forma de calcular o risco, denominado RPNI, que leva em consideração o índice de severidade, a probabilidade de ocorrência, a probabilidade de detecção e o índice de impacto. A partir desse índice, foi então possível determinar o rol de componentes a serem considerados prioritários para o sistema e propor as medidas cabíveis tendo em vista a segurança e confiabilidade do sistema.

De modo geral, para componentes que apresentaram um índice de impacto superior a 15% sugeriu-se a adição de redundâncias, visto que são essenciais para a confiabilidade do sistema em questão. Outros componentes não apresentaram índice de impacto elevado, mas também foram considerados críticos devido ao alto grau de severidade associado às suas falhas. Para esses componentes, a fim de evitar que venham a ocorrer falhas severas, sugeriu-se a realização de programas de manutenção preventiva mais intensa. Aos demais componentes, a melhoria a ser realizada depende dos tipos de falha predominantes em cada um.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

O estudo realizado teve como base dados predominantemente qualitativos, devido à lacuna de informações existentes em um sistema novo em desenvolvimento. Assim, sugere-se que o procedimento utilizado seja repetido assim que dados quantitativos estiverem disponíveis (através, por exemplo, da realização de testes físicos nos componentes, mesmo que em escala piloto), a fim de verificar a validade do procedimento.

Após, sugere-se ainda que o mesmo procedimento seja aplicado a sistemas distintos, a fim de verificar sua adaptação às mais diversas situações, objetivando sua melhoria e generalização.

Outra sugestão é adicionar o custo na proposta, de modo a tornar possível verificar o incremento do custo referente a cada proposta de melhoria sugerida e, por conseguinte, a correspondente melhora na confiabilidade obtida. Com esse valor, torna-se ainda mais evidente os componentes que deverão ser priorizados no sistema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEROMOVEL. **Sistema de transporte automatizado em via elevada**. Disponível em: < <http://www.aeromovel.com.br/> >. Acesso em: ago. 2008.
- ANDRADE, L. F. S.; ZARDO, C. R.; FORCELLINI, F. A. **O uso do FMEA como uma métrica para a confiabilidade no projeto conceitual**. In: V CBGDP, Curitiba, ago. 2005. 8 p.
- ANDRADE, M. R. S.; TURRIONI, J. B. **Uma metodologia de análise dos aspectos e impactos ambientais através da utilização do FMEA**. In: XX ENEGEP, São Paulo, 2000. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994. 37 p.
- AVIZIENIS, A.; LAPRIE, J. C.; RANDELL, B.; LANDWEHR, C. Basic concepts and taxonomy of dependable and security computing. **IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing**. New York, v. 1, n. 1, p. 11-33, jan./mar. 2004.
- BASTOS, A. L. A. **FMEA como ferramenta de prevenção da qualidade em produtos e processos: uma avaliação da aplicação em um processo produtivo de usinagem de engrenagem**. In: XXVI ENEGEP, Fortaleza, out. 2006. 8 p.
- BEN-DAYA, M. B.; RAOUF, A. A revised failure mode and effects analysis model. **International Journal of Quality & Reliability Management**. Bradford, v. 13, n. 1, p. 43-47, 1996.
- BOLAND, P. J.; EL-NEWEIHI, E.; PROSCHAN, F. Stochastic order for redundancy allocations in series and parallel systems. **Advances in Applied Probability**. Sheffield, v. 24, n. 1, p. 161-171, mar. 1992.
- BORGES, W. S.; COLOSIMO, E. A.; FREITAS, M. A. **Métodos estatísticos e melhoria da qualidade: construindo confiabilidade em produtos**. In: 12ª SINAPE. Caxambu: ABE. 1996. 221 p.
- CAPALDO, D.; GUERRERO, V.; ROZENFELD, H. (1999). **FMEA (failure mode and effect analysis)**. Disponível em: < <http://www.numa.org.br> >. Acesso em: 17 nov. 2007.
- CARVALHO JR., A. N.; ANDERY, P. R. P. **Aplicação de ferramentas de análise de falhas à melhoria de processos de execução em obras prediais**. In: XIX ENEGEP, Rio de Janeiro, 1999. 15 p.
- CHANG, C. L.; LIU, P. H.; WEI, C. C. Failure mode and effects analysis using grey theory. **Integrated Manufacturing Systems**. Bradford, v. 12, n. 3, p. 211-216, 2001.
- CHEN, C. N.; TING, S. C. A study using the grey system theory to evaluate the importance of various service quality factors. **International Journal of Quality & Reliability Management**. Bradford, v. 19, n. 7, p. 838-861, 2002.

CHUKOVA, R.; ARNOLD, R.; WANG, D. Q. Warranty analysis: an approach to modeling imperfect repairs. **International Journal of Production Economics**. Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 57-68, mar. 2004.

CROWE, D.; FEINBERG, A. **Design for reliability**. Boca Raton: CRC Press, 2001. 220 p.

DENSON, W. The history of reliability prediction. **IEEE Transactions on Reliability**. New York, v. 47, n. 3, p. 321-328, set. 1998.

DHILLON, B. S. **Engineering maintenance: a modern approach**. Boca Raton: CRC Press, 2002. 224 p.

DHILLON, B. S. **Reliability, quality and safety for engineers**. Boca Raton: CRC Press, 2005. 217 p.

DOGANAKSOY, N.; HAHN, G. J.; MEEKER, W. Q. Reliability analysis by failure mode. **Quality Progress**. Milwaukee, v. 35, n. 6, p. 47-52, jun. 2002.

DUWE, B.; FUCHS, B.; FLASCHEN, J. H. Failure mode and effects analysis application to critical care medicine. **Critical Care Clinics**. Philadelphia, v. 21, n. 1, p. 21-30, jan. 2005.

EBEL, G. H. Reliability physics in electronics: a historical view. **IEEE Transactions on Reliability**. New York, v. 47, n. 3, p. 379-389, set. 1998.

ELSAYED, E. A. **Reliability engineering**. Massachusetts: Addison Wesley, 1996. 737 p.

ENGEL, G. I. Pesquisa-ação. **Educar**. Curitiba, n. 16, p. 181-191. 2000.

FERNANDES, J. M. R.; REBELATO, M. G. Proposta de um método para integração entre QFD e FMEA. **Gestão & Produção**. São Carlos, v. 13, n. 2, p. 245-259, mai./ago. 2006.

FOSS, C.; ELLEFSEN, B. The value of combining qualitative and quantitative approaches in nursing research by means of method triangulation. **Journal of Advanced Nursing**. Oxford, v. 40, n. 2, p. 242-248, out. 2002.

GILCHRIST, W. Modelling failure modes and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**. Bradford, v. 10, n. 5, p. 16-23, 1993.

GINN, D. M.; JONES, D. V.; RAHNEJAT, H.; ZAIRI, M. The "QFD/FMEA interface". **European Journal of Innovation Management**. Bradford, v. 1, n. 1, p. 7-20, 1998.

GÜNTHER, H. Pesquisa qualitativa *versus* pesquisa quantitativa: esta é a questão? **Psicologia: Teoria e Pesquisa**. Brasília, v. 22, n. 2, p. 201-210, mai./ago. 2006.

HAYATI, D.; KARAMI, E.; SLEE, B. Combining qualitative and quantitative methods in the measurement of rural poverty: the case of Iran. **Social Indicators Research**. Dordrecht, v.75, n. 3, p.361-394, fev. 2006.

- HECHT, H. **Systems reliability and failure prevention**. Norwood: Artech House, 2003. 230 p.
- HELMAN, H.; ANDERY, P. R. P. **Análise de falhas: aplicação dos métodos de FMEA e FTA**. Belo Horizonte: FCO, 1995. 156 p.
- KECECIOGLU, D. **Reliability engineering handbook**. Lancaster: DEStech Publications, v. 1, 2002. 691 p.
- KUMAR, C. S. Standby redundancy at system and component levels: a comparison. **Microelectronics and Reliability**. Oxford, v. 35, n. 4, p. 751-752, abr. 1995.
- LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001. 374 p.
- LEEMIS, L. M. **Reliability, probabilistic models and statistical methods**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1995. 319 p.
- LIMA, P. F. A.; FRANZ, L. A. S.; AMARAL, F. G. **Proposta de utilização do FTA como ferramenta de apoio ao FMEA em uma empresa do ramo automotivo**. In: XIII SIMPEP, Bauru, nov. 2006. 10 p.
- MACHADO, R. L.; MELO, G. C. **Utilização do FMEA na melhoria de processos de fabricação da indústria farmacêutica**. In: XXVII ENEGEP, Foz do Iguaçu, out. 2007. 10 p.
- MALEC, H. System reliability. In: IRESOON, W. G.; COOMBS, C. R.; MOSS, R. Y. (ed.). **Handbook of reliability engineering and management**. New York: McGraw-Hill, 2 ed., 1995. 816 p.
- NELSON, W. B. A bibliography of accelerated test plans. **IEEE Transactions on Reliability**. New York, v. 54, n. 2, p. 194-197, jun. 2005.<sup>a</sup>
- NELSON, W. B. A bibliography of accelerated test plans part II - references. **IEEE Transactions on Reliability**. New York, v. 54, n. 3, p. 370-373, set. 2005.<sup>b</sup>
- NEVES, J. L. Pesquisa qualitativa: características, usos e possibilidades. **Caderno de Pesquisas em Administração**. São Paulo, v. 1, n. 3, 1996.
- NIST/SEMATECH. **e-Handbook of statistical methods**. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2006. Disponível em: < [www.itl.nist.gov/div898/handbook/](http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/) >. Acesso em: jul. 2008.
- PICKARD, K.; MÜLLER, P.; BERTSCHE, B. Synergies of FMEA and other quantitative quality methods for an optimized quality assurance. In: MCNULTY, G. J. (ed.). **5th International Conference on Quality, Reliability, and Maintenance: QRM 2004**. Bury: Professional Engineering, 2004. p. 35-38.

PUENTE, J.; PINA, R.; PRIORE, P.; FUENTE, D. A decision support system for applying failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**. Bradford, v. 19, n. 2, p. 73-83, 2002.

RAUSAND, M.; HOYLAND, A. **System reliability theory: models, statistical methods, and applications**. Hoboken: Wiley-Interscience, 2 ed., 2003. 636 p.

RAUSAND, M.; OIEN, K. The basic concepts of failure analysis. **Reliability Engineering and System Safety**. Barking, v. 53, n. 1, p. 73-83, jul. 1996.

REID, D. FMEA: something old, something new. **Quality Progress**. Milwaukee, v. 38, n. 5, p. 90-93, mai. 2005.

RELIASOFT. **System analysis reference: reliability, availability and optimization**. Tucson: Reliasoft Publishing, 2007. 487 p. Disponível em: < <http://www.weibull.com/systemrelwebcontents.htm> >. Acesso em: jun. 2008.

RELIASOFT BRASIL. Características da distribuição de Weibull. **Reliability HotWire**. Tucson, v. 24, fev. 2007. Disponível em: < <http://www.reliasoft.com.br/hotwire/edicao24/conceito24.htm> >. Acesso em: jul. 2008.

RIBEIRO, J. L. D. **Definição de parâmetros das distribuições Weibull para componentes elétricos e mecânicos**. Notas de Aula, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre, abr. 2008.

ROZENFELD, H.; AMARAL, D. C.; ALLIPRANDINI, D. H.; FORCELLINI, F. A.; TOLEDO, J. C.; SCALICE, R. K.; SILVA, S. L. **Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006. 542 p.

SANKAR, N. R.; PRABHU, B. S. Modified approach for prioritization of failures in a system failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**. Bradford, v. 18, n. 3, p. 324-335, 2001.

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

SHAKED, M.; SHANTHIKUMAR, J. G. Optimal allocation of resources to nodes of parallel and series systems. **Advances in Applied Probability**. Sheffield, v. 24, n. 4, p. 894-914, dez. 1992.

SILVA, A. H. C. **Aplicação da metodologia FMEA (failure mode and effect analysis) para realização de análise de falhas em um sistema de pontes de embarque de um aeroporto**. In: XXVII ENEGEP, Foz do Iguaçu, out. 2007. 10 p.

SIQUEIRA, I. P. **Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implementação**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005, 374 p.

SKELTON, B. **Process safety analysis: an introduction**. Warwickshire: Institution of Chemical Engineers, 1997. 220 p.

SMITH, D. J. **Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers**. Oxford: Butterworth Heinemann, 6 ed., 2001. 335 p.

STAMATIS, D. H. **Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution**. Wisconsin: ASQC, 1995. 494 p.

TENG, S. H.; HO, S. Y. Failure mode and effects analysis: an integrate approach for product design and process control. **International Journal of Quality & Reliability Management**. Bradford, v. 13, n. 5, p. 8-26, 1996.

WEINHOLTZ, D.; KACER, B.; ROCHLIN, T. Salvaging quantitative research with qualitative data. **Qualitative Health Research**. Thousand Oaks, v. 5, n.,3 p. 388-397, ago. 1995

WILKINS, D. J. The bathtub curve and product failure behavior – part one: the bathtub curve, infant mortality and burn-in. **Reliability HotWire**. Tucson, v. 21, nov. 2002. Disponível em: < <http://www.weibull.com/hotwire/issue21/hottopics21.htm> >. Acesso em: jun. 2008.<sup>a</sup>

WILKINS, D. J. The bathtub curve and product failure behavior – part two: normal life and wear-out. **Reliability HotWire**. Tucson, v. 22, dez. 2002. Disponível em: < <http://www.weibull.com/hotwire/issue22/hottopics22.htm> >. Acesso em: jun. 2008.<sup>b</sup>

## APÊNDICE A

FMEA dos sistemas de controle e de propulsão do Aeromovel

Componente	Função	Modo Potencial de Falha	Efeito Potencial de falha	Causa Potencial de Falha	Controles Atuais	S	O	D	R
<b>VEÍCULO</b>									
<b>Sensor Magnético</b>	Detectar pulsos	Erro na contagem de pulso	Erro nas estimativas de posição, velocidade e aceleração	Dano físico do sensor	Posicionamento protegido, PC	1	2,5	1	2,5
				Queima da bobina ou circuito	QC	1	1	5	5
				Ruptura ou mau contato no cabo	Disposição e fixação do cabo	1	1,5	5	7,5
<i>Reed Swicht</i>	Detectar pulso magnético	Perde pulsos	Erro nas estimativas de posição	Dano físico do sensor	PC	1	5	1	5
				Dano físico nos ativadores de pulsos	Robustez dos ativadores de pulsos	1	1	1	1
				Queima da bobina ou circuito	QC	1	1	5	5
				Ruptura ou mau contato no cabo	Disposição e fixação do cabo	1	1,5	5	7,5
				Oscilações verticais e horizontais do veículo	PC	1	3	1	3
		Ler falsos pulsos	Perda nas estimativas de posição	Dano físico do ativador	QC, PC	2	2	3	12
		Mau posicionamento dos ativadores	PC	2	1	2	4		
Má fixação	PMP, cuidados na fixação dos ativadores	2	1	2	4				
<b>Sensor Pressão</b>	Medir diferença de pressão entre jusante e montante da aleta	Leitura errada de pressão	Perda de diagnósticos referentes a vazamentos ou problemas na abertura de válvulas	Mau posicionamento do sensor	PC	1	2	1	2
				Rompimento ou entupimento da mangueira	PMP, cuidados na fixação da mangueira	1	5	5	25
				Falha mecânica do sensor	QC, posicionamento do componente	1	2	4	8
				Falha elétrica do sensor	QC	1	2	4	8
<b>Ativadores de pulsos</b>	Emitir pulsos	Deixar de emitir pulsos	Perda nas estimativas de posição	Dano físico do ativador	QC, PC	2	3	3	18
				Mau posicionamento dos ativadores	PC	2	2	2	8
				Má fixação	PMP, cuidados na fixação dos ativadores	2	2	2	8
<b>ABS</b>	Frear o veículo suave e precisamente	Falta de frenagem	Colisão na VIT	Falha mecânica	PC, PMP	10	3	2	60
				Falha de controle	PC, circuitos supervisorio ( <i>watch dog</i> )	10	2	5	100
		Excesso de frenagem	Danos físicos nos passageiros	Falha mecânica	PC, PMP	10	3	2	60
				Falha de controle	PC, circuitos supervisorio ( <i>watch dog</i> )	10	2	5	100

Componente	Função	Modo Potencial de Falha	Efeito Potencial de falha	Causa Potencial de Falha	Controles Atuais	S	O	D	R
<b>Freio de emergência</b>	Parar o veículo em situações de perigo	Não funcionar quando solicitado	Danos físicos nos passageiros	Falha na transmissão	PC, PMP	10	3	2	60
				Falha mecânica	PC, PMP	10	3	2	60
<b>Freio de estacionamento</b>	Manter o veículo parado quando o mesmo é estacionado	Não funcionar quando solicitado	Danos ao veículo	Falha na transmissão	PC, PMP	6	3	2	36
				Falha mecânica	PC, PMP	6	3	2	36
<b>Compressor</b>	Fornecer ar comprimido para portas e freio ABS	Não fornecer a pressão adequada	Freio de emergência é acionado, interrompe a operação, portas não funcionam	Falha elétrica	QC, PMP	7	3	2	42
				Falha mecânica	QC, PMP	7	3	2	42
				Rompimento de mangueiras	Posicionamento das mangueiras, PMP	7	3	3	63
<b>Software</b>	Controle das funções do sistema	Processamento errado ou inexistente	Acidente	Falha no algoritmo	PC	10	3	3	90
<b>CLP-CPU</b>	Controle das funções do sistema	Processamento errado ou inexistente	Acidente	Falha elétrica	QC, auto teste	10	2	4	80
<b>Driver Potência</b>	Transformar sinal de saída em potência	Erro no processamento do sinal	Acidente	Falha elétrica	QC, PC, auto teste	10	2	4	80
<b>Condicionador de Sinal</b>	Transformar sinais em voltagem compatível com a CPU-CLP	Erro no processamento do sinal	Queda no desempenho do sistema	Falha elétrica	QC, PC, auto teste	5	2	4	40
<b>UNIDADES DE PROPULSÃO</b>									
<b>Motor Elétrico</b>	Prover energia mecânica para acionar o ventilador	Não prover energia ao ventilador	Queda no desempenho do sistema	Falha elétrica	QC, PMP	5	1,5	2	15
				Falha mecânica	QC, PMP, PC	5	1,5	1,5	11,3
				Má instalação do motor	PC	5	1	1	5
<b>Ventilador</b>	Prover fluxo de ar	Não prover fluxo de ar	Queda no desempenho do sistema	Falha mecânica	QC, PC, PMP	5	1	1	5
				Má instalação do ventilador	PC	5	1	1	5
				Acidente	Falha mecânica	QC, PC, PMP	10	1	1
				Má instalação do ventilador	PC	10	1	1	10
<b>Inversor de Frequência</b>	Controlar a velocidade de rotação do motor	Erro no controle da velocidade do motor	Queda no desempenho do sistema	Falha elétrica	QC, instalação da rede elétrica, PC	5	2	3	30
<b>Válvulas de Controle</b>	Controlar fluxo de ar	Erro no controle do fluxo de ar	Queda no desempenho do sistema	Falha mecânica	PMP, QC, PC	5	3	2	30
				Bloqueio por detritos	Projeto do GMP e PI periódica do GMP, sensor de posição	5	1	5	25

Componente	Função	Modo Potencial de Falha	Efeito Potencial de falha	Causa Potencial de Falha	Controles Atuais	S	O	D	R
<b>Sensor Pressão 1</b>	Medir diferença de pressão entre a saída do ventilador e a válvula de controle	Leitura errada de pressão	Perda de diagnósticos referentes a pressurização do ventilador	Mau posicionamento do sensor	PC	1	2	1	2
				Rompimento ou entupimento da mangueira	PMP, cuidados na fixação da mangueira	1	5	5	25
				Falha mecânica do sensor	QC, posicionamento do componente	1	4	4	16
				Falha elétrica do sensor	QC	1	2	4	8
<b>Válvula Atmosférica</b>	Permitir pressurização e depressurização do duto	Erro na pressurização	Interrompe o funcionamento do sistema	Falha mecânica	PMP, QC, PC	7	2	2	28
				Bloqueio por detritos	Projeto da via e PI periódica da via, sensor de posição	7	1	5	35
<b>Válvula Isolamento de Trecho</b>	Permitir o isolamento da propulsão em dois trechos da via	Erro no isolamento de trechos	Perda de controle do movimento do veículo	Falha mecânica	PMP, qualidade dos componentes, PC	7	2	2	28
				Bloqueio por detritos	PI periódica da via, projeto da válvula, sensores de posição	7	1	5	35
<b>Válvulas Direcionamento de Fluxo</b>	Gerenciar a mudança de direção do fluxo	Erro no direcionamento do fluxo	Perda de controle do movimento do veículo	Falha mecânica	PMP, QC, PC	7	2	2	28
				Bloqueio por detritos	PI periódica da via, projeto da válvula, sensores de posição	7	1	5	35
<b>Sensor Pressão 2</b>	Medir diferença de pressão entre a saída das válvulas e a linha	Leitura errada de pressão	Perda de diagnósticos referentes a vazamentos ou problemas na abertura de válvulas	Mau posicionamento do sensor	PC	1	2	2	4
				Rompimento ou entupimento da mangueira	PMP, cuidados na fixação da mangueira	1	5	5	25
				Falha mecânica do sensor	QC, posicionamento do componente	1	2	2	4
				Falha elétrica do sensor	QC	1	2	2	4
<b>Rede Reed Swicht</b>	Detectar pulso magnético	Perder pulsos	Perda nas estimativas de posição	Dano físico dos sensores	PC, PMP	2	2	3	12
				Dano físico nos ímãs (ou anteparos)	Robustez dos ímãs (ou anteparos), PC	2	2	3	12
				Queima dos circuitos	QC	2	3	8	48
				Ruptura ou mau contato nos cabos	Disposição e fixação dos cabos	2	1	9	18
				Mau posicionamento dos sensores	PC, PMP	2	2	2	8

Componente	Função	Modo Potencial de Falha	Efeito Potencial de falha	Causa Potencial de Falha	Controles Atuais	S	O	D	R
<b>Ativadores de pulsos fixos na via</b>	Emitir pulsos	Deixar de emitir pulsos	Perda nas estimativas de posição	Dano físico do ativador	QC, PC	2	2	3	12
				Mau posicionamento dos ativadores	PC	2	1	2	4
				Má fixação	PMP, cuidados na fixação dos ativadores	2	1	2	4
<b>Condicionador de Sinal</b>	Transformar sinais em voltagem compatível com a CPU-CLP	Erro no processamento do sinal	Queda no desempenho do sistema	Falha elétrica	QC, PC, auto-teste	5	2	3	30
<b>CLP-CPU</b>	Controle das funções do sistema	Processamento errado ou inexistente	Queda no desempenho do sistema	Falha elétrica	QC, auto-teste	5	2	3	30
<b>Software</b>	Controle das funções do sistema	Processamento errado ou inexistente	Queda no desempenho do sistema	Falha no algoritmo	PC	5	3	3	45
<b>Driver Potência</b>	Transformar sinal de saída em potência	Erro no processamento do sinal	Queda no desempenho do sistema	Falha elétrica	QC, PC, auto teste	5	2	3	30
<b>APARELHO DE MUDANÇA DE VIA</b>									
<b>Sistema Atuador</b>	Posicionar os trilhos e vedar o duto	Não realizar acionamento	Sistema vai parar	Falha mecânica	PMP, GA	7	4	2	56
				Falha elétrica	PMP, GA	7	3	5	105
				Falha hidráulica	PMP, GA	7	4	5	140
			Queda de desempenho	Falha mecânica	PMP, GA	5	5	2	50
				Falha elétrica	PMP, GA	5	4	5	100
				Falha hidráulica	PMP, GA	5	5	5	125
		Realizar indevidamente o acionamento	Acidente	Falha mecânica	PMP, GA	10	1	2	20
				Falha elétrica	PMP, GA	10	1	5	50
				Falha hidráulica	PMP, GA	10	1	5	50
			Sistema vai parar	Falha mecânica	PMP, GA	7	1	2	14
				Falha elétrica	PMP, GA	7	1	5	35
				Falha hidráulica	PMP, GA	7	1	5	35

Componente	Função	Modo Potencial de Falha	Efeito Potencial de falha	Causa Potencial de Falha	Controles Atuais	S	O	D	R
<b>Trilhos móveis</b>	Modificar a direção dos trilhos	Não mudar a direção completamente	O veículo pára	Falha mecânica	PMP, GA	7	2	1	14
			O veículo descarrila	Falha mecânica	PMP, Dispositivos de segurança	10	1	4	40
		Não mudar a direção	O veículo pára	Falha mecânica	PMP, GA	7	2	3	42
			Queda de desempenho	Falha mecânica	PMP, GA	5	2	3	30
<b>Sistema de sensores</b>	Conjunto de operação, segurança e manutenção	Não apresentar o status	O veículo pára	Falha elétrica	PMP, GA	7	2	8	112
				Falha mecânica	PMP, GA	7	2	8	112
		Apresentar status incorreto	O veículo continua se movimentando	Falha elétrica	Redundância do conjunto de sensores	10	2	1	20
				Falha mecânica	Redundância do conjunto de sensores	10	2	1	20
<b>Sistema elétrico</b>	Prover energia ao veículo	Não prover energia	O veículo pára	Falha elétrica ou proteção elétrica (sobrecarga)	Redundância dos componentes, Análise confiabilidade dos componentes do sistema de proteção (fusível)	7	2	1	14
			Queda de desempenho	Falha elétrica ou proteção elétrica (sobrecarga)	Redundância dos componentes, Análise confiabilidade dos componentes do sistema de proteção (fusível)	5	2	1	10
<b>COMUNICAÇÃO</b>									
<b>Módulo de comunicação</b>	Enviar e receber dados entre veículos e módulos	Não enviar ou receber dados	Interrompe o funcionamento do sistema	Falha elétrica	QC, auto-teste	7	2	8	112
				Dano físico	PC	7	1	8	56
				Interferências ou barreiras	PC	7	3	4	84
		Enviar ou receber erroneamente dados	Queda de desempenho	Interferências	PC, teste CRC	5	4	9	180
				Interrompe o funcionamento do sistema	Interferências	PC, teste CRC	7	2	1

Componente	Função	Modo Potencial de Falha	Efeito Potencial de falha	Causa Potencial de Falha	Controles Atuais	S	O	D	R
<b>Antena</b>	Converter sinal elétrico em eletromagnético e vice-versa	Não converter os sinais efetivamente	Interrompe o funcionamento do sistema	Dano físico	QC, PC, Instalação	7	2	8	112
				Falha elétrica	PC, qualidade do cabo, instalação	7	1	8	56
			Queda de desempenho	Dano físico	QC, PC, Instalação	5	2	8	80
<b>Fonte de alimentação</b>	Fornecer energia aos módulos de comunicação	Não fornecer energia	Interrompe o funcionamento do sistema	Falha elétrica	QC, PC, Instalação	7	2	8	112
				Rompimento do cabo	PC, instalação, qualidade do cabo	7	1	5	35
<b>Comunicação por cabos</b>	Enviar e receber dados entre as estações	Não enviar ou receber dados	Interrompe o funcionamento do sistema	Rompimento do cabo	QC, PC, instalação, PI	7	1	3	21
				Forte interferência eletromagnética	QC, PC, instalação, PI	7	2	3	42
			Queda de desempenho	Interferência por condições ambientais	QC, PC, instalação, PI	5	1	8	40
				Leve interferência eletromagnética	QC, PC, instalação, PI	5	1	3	15

LEGENDA: PMP: Programa de Manutenção Preventiva

PC: Programa de Comissionamento

CRC: Código de Redundância Cíclica

GA: Gerenciamento de Ativos

QC: Qualidade do Componente

PI: Programa de Inspeção

## APÊNDICE B

Componentes críticos dos sistemas de controle e de propulsão do sistema Aeromovel pela FMEA segundo critérios estabelecidos

<b>Componente</b>	<b>Efeito Potencial de falha</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>D</b>	<b>R</b>
<b>Módulo de comunicação</b>	Queda de desempenho	5	4	9	180
<b>Sistema Atuador (AMV)</b>	Sistema vai parar	7	4	5	140
<b>Sistema Atuador (AMV)</b>	Queda de desempenho	5	5	5	125
<b>Sistema de sensores (AMV)</b>	O veículo pára	7	2	8	112
<b>Módulo de comunicação</b>	Interrompe o funcionamento do sistema	7	2	8	112
<b>Antena</b>	Interrompe o funcionamento do sistema	7	2	8	112
<b>Fonte de alimentação</b>	Interrompe o funcionamento do sistema	7	2	8	112
<b>ABS (V)</b>	Colisão na VIT	10	2	5	100
<b>ABS (V)</b>	Danos físicos nos passageiros	10	2	5	100
<b>Software (V)</b>	Acidente	10	3	3	90
<b>CLP-CPU (V)</b>	Acidente	10	2	4	80
<b>Driver Potência (V)</b>	Acidente	10	2	4	80
<b>Driver Potência (V)</b>	Queda de desempenho	5	2	8	80
<b>Compressor (V)</b>	Freio de emergência é acionado, interrompe a operação, portas não funcionam	7	3	3	63
<b>Freio de emergência (V)</b>	Danos físicos nos passageiros	10	3	2	60
<b>Sistema Atuador (AMV)</b>	Acidente	10	1	5	50
<b>Rede Reed Swicht (UP)</b>	Perda nas estimativas de posição	2	3	8	48
<b>Trilhos móveis (AMV)</b>	O veículo pára	7	2	3	42
<b>Comunicação por cabos</b>	Interrompe o funcionamento do sistema	7	2	3	42
<b>Condicionador de Sinal (V)</b>	Queda no desempenho do sistema	5	2	4	40
<b>Trilhos móveis (AMV)</b>	O veículo descarrila	10	1	4	40
<b>Comunicação por cabos</b>	Queda de desempenho	5	1	8	40
<b>Válvula Atmosférica (UP)</b>	Interrompe o funcionamento do sistema	7	1	5	35
<b>VIT (UP)</b>	Perda de controle do movimento do veículo	7	1	5	35
<b>VDF (UP)</b>	Perda de controle do movimento do veículo	7	1	5	35
<b>Sistema de sensores (AMV)</b>	O veículo continua se movimentando	10	2	1	20
<b>Sistema elétrico (AMV)</b>	O veículo pára	7	2	1	14
<b>Ventilador (UP)</b>	Acidente	10	1	1	10

LEGENDA: V: Veículo

UP: Unidade de Propulsão

AMV: Aparelho de Mudança de Via

VDF: Válvula de Direcionamento de Fluxo

VIT: Válvula de Isolamento de Trecho

## APÊNDICE C

Taxas de falha e MTBF dos componentes dos sistemas de propulsão e de controle do sistema  
Aeromovel

Componente	Taxa de Falha (por viagem)	MTBF (viagem)
<b>VEÍCULO</b>		
Sensor Magnético	0,000124	8033
<i>Reed Swicht</i>	0,002815	355
Sensor Pressão	0,002650	377
Ativadores de pulsos	0,000350	2857
ABS	0,000600	1667
Freio de emergência	0,000500	2000
Freio de estacionamento	0,000500	2000
Compressor	0,000750	1333
<i>Software</i>	0,000250	4000
CLP-CPU	0,000050	20000
<i>Driver Potência</i>	0,000050	20000
Condicionador de Sinal	0,000050	20000
<b>UNIDADE DE PROPULSÃO 1</b>		
Motor Elétrico	0,000024	42127
Ventilador	0,000004	250000
Inversor de Frequência	0,000050	20000
Válvulas de Controle	0,000251	3984
Sensor Pressão	0,003600	278
Válvula Atmosférica	0,000051	19608
Válvula Isolamento de Trecho	0,000051	19608
Válvulas Direcionamento de Fluxo	0,000051	19608
Sensor Pressão	0,002650	377
Rede <i>Reed Swicht</i>	0,000401	2494
Ativadores de pulsos fixos na via	0,000052	19231
Condicionador de Sinal	0,000050	20000
CLP-CPU	0,000050	20000
Software	0,000250	4000
<i>Driver Potência</i>	0,000050	20000
<b>UNIDADE DE PROPULSÃO 2</b>		
Motor Elétrico	0,000024	42127
Ventilador	0,000004	250000
Inversor de Frequência	0,000050	20000
Válvulas de Controle	0,000251	3984
Sensor Pressão	0,003600	278

<b>Componente</b>	<b>Taxa de Falha (por viagem)</b>	<b>MTBF (viagem)</b>
<b>Válvula Atmosférica</b>	0,000051	19608
<b>Válvula Isolamento Trecho</b>	0,000051	19608
<b>Sensor Pressão</b>	0,002650	377
<b>Rede Reed Swicht</b>	0,000401	2494
<b>Ativadores de pulsos fixos na via</b>	0,000052	19231
<b>Condicionador de Sinal</b>	0,000050	20000
<b>CLP-CPU</b>	0,000050	20000
<b>Software</b>	0,000250	4000
<b>Driver Potência</b>	0,000050	20000
<b>APARELHO DE MUDANÇA DE VIA</b>		
<b>Sistema Atuador</b>	0,008256	121
<b>Trilhos móveis</b>	0,000151	6623
<b>Sistema de sensores</b>	0,000200	5000
<b>Sistema elétrico</b>	0,000100	10000
<b>COMUNICAÇÃO</b>		
<b>Módulo de comunicação</b>	0,001351	740
<b>Antena</b>	0,000101	9901
<b>Fonte de alimentação</b>	0,000051	19608
<b>Comunicação por cabos</b>	0,000053	18868

## APÊNDICE D

Parâmetros e respectivas confiabilidades dos componentes dos sistemas de controle e de propulsão do sistema Aeromovel

Componente	Falha predominante	Parâmetro de forma ( $\beta$ )	Parâmetro de escala ( $\eta$ )	Parâmetro de localização ( $\gamma$ )	Confiabilidade R(t)
<b>VEÍCULO</b>					
Sensor Magnético	Eletromecânica	1,5	8899	0	0,998810
<i>Reed Swicht</i>	Elétrica	1,0	355	0	0,754623
Sensor Pressão	Eletromecânica	1,5	418	0	0,889587
Ativadores de pulsos	Elétrica	1,0	2857	0	0,965605
ABS	Mecânica	2,0	940	833	1
Freio de emergência	Mecânica	2,0	1128	1000	1
Freio de estacionamento	Mecânica	2,0	1128	1000	1
Compressor	Eletromecânica	1,5	1477	0	0,982539
<i>Software</i>	Elétrica	1,0	4000	0	0,975310
CLP-CPU	Elétrica	1,0	20000	0	0,995012
<i>Driver Potência</i>	Elétrica	1,0	20000	0	0,995012
Condicionador de Sinal	Elétrica	1,0	20000	0	0,995012
<b>UNIDADE DE PROPULSÃO 1</b>					
Motor Elétrico	Eletromecânica	1,5	46669	0	0,999901
Ventilador	Eletromecânica	1,5	276950	0	0,999993
Inversor de Frequência	Elétrica	1,0	20000	0	0,995012
Válvulas de Controle	Mecânica	2,0	2248	1992	1
Sensor Pressão	Eletromecânica	1,5	308	0	0,830895
Válvula Atmosférica	Mecânica	2,0	11063	9804	1
Válvula Isolamento Trecho	Mecânica	2,0	11063	9804	1
Válvulas Direcionamento de Fluxo	Mecânica	2,0	11063	9804	1
Sensor Pressão	Eletromecânica	1,5	418	0	0,889587
Rede <i>Reed Swicht</i>	Elétrica	1,0	2494	0	0,960693
Ativadores de pulsos fixos na via	Elétrica	1,0	19231	0	0,994813
Condicionador de Sinal	Elétrica	1,0	20000	0	0,995012
CLP-CPU	Elétrica	1,0	20000	0	0,995012
<i>Software</i>	Elétrica	1,0	4000	0	0,975310
<i>Driver Potência</i>	Elétrica	1,0	20000	0	0,995012

Componente	Falha predominante	Parâmetro de forma ( $\beta$ )	Parâmetro de escala ( $\eta$ )	Parâmetro de localização ( $\gamma$ )	Confiabilidade R(t)
<b>UNIDADE DE PROPULSÃO 2</b>					
Motor Elétrico	Eletromecânica	1,5	46669	0	0,999901
Ventilador	Eletromecânica	1,5	276950	0	0,999993
Inversor de Frequência	Elétrica	1,0	20000	0	0,995012
Válvulas de Controle	Mecânica	2,0	2248	1992	1
Sensor Pressão	Eletromecânica	1,5	308	0	0,830895
Válvula Atmosférica	Mecânica	2,0	11063	9804	1
Válvula Isolamento Trecho	Mecânica	2,0	11063	9804	1
Sensor Pressão	Eletromecânica	1,5	418	0	0,889587
Rede <i>Reed Swicht</i>	Elétrica	1,0	2494	0	0,960693
Ativadores de pulsos fixos na via	Elétrica	1,0	19231	0	0,994813
Condicionador de Sinal	Elétrica	1,0	20000	0	0,995012
CLP-CPU	Elétrica	1,0	20000	0	0,995012
Software	Elétrica	1,0	4000	0	0,975310
Driver Potência	Elétrica	1,0	20000	0	0,995012
<b>APARELHO DE MUDANÇA DE VIA</b>					
Sistema Atuador	Eletromecânica	1,5	161	0	0,999510
Trilhos móveis	Mecânica	2,0	3736	3311	1
Sistema de sensores	Eletromecânica	1,5	6638	0	0,999998
Sistema elétrico	Elétrica	1,0	10000	0	0,999900
<b>COMUNICAÇÃO</b>					
Módulo de comunicação	Elétrica	1,0	740	0	0,873629
Antena	Elétrica	1,0	9901	0	0,989951
Fonte de alimentação	Elétrica	1,0	19608	0	0,994913
Comunicação por cabos	Elétrica	1,0	18868	0	0,994714