

FAUSTINA BEATRIZ NATACCI

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE ATRAVÉS DO MÉTODO DE ÁRVORE DE
FALHAS - APLICAÇÃO PARA O SISTEMA DE LINHA DE EIXO DE UM
SUBMARINO

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

SÃO PAULO

1994

OK

FAUSTINA BEATRIZ NATACCI

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE ATRAVÉS DO MÉTODO DE ÁRVORE DE
FALHAS - APLICAÇÃO PARA O SISTEMA DE LINHA DE EIXO DE UM
SUBMARINO

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Naval

Orientador:
Hernani Luiz Brinati

SÃO PAULO

1994

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600009998

À minha filha Samantha e aos meus pais, Rosa e Francisco. Aceitem minha gratidão e reconhecimento pela alegria e incentivo que trazem à minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Hernani Luiz Brinati pela valorosa colaboração e, acima de tudo, pela compreensão e paciência na condução deste trabalho.

Aos meus pais, Rosa e Francisco, pelo constante incentivo e apoio.

Ao amigo Prof. Dr. Wagner de Souza Borges pelo auxílio no desenvolvimento matemático.

Aos amigos, Anilton de Jesus Santos e Mario Mamoru Kotani, pela cooperação com os equipamentos de *hardware*.

Aos amigos, Dr. José Messias de Oliveira Neto e Antonio Souza Vieira Neto, e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram na execução deste trabalho.

SUMÁRIO

	Lista de figuras	
	Lista de tabelas	
	Resumo	
	"Abstract"	
1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Definição do problema	1
1.2	Revisão bibliográfica de aplicações de análise de confiabilidade	3
1.3	Objetivo do trabalho	11
2	FUNDAMENTOS DA TEORIA DE CONFIABILIDADE	13
2.1	Considerações gerais	13
2.2	Modelamento de confiabilidade	15
2.2.1	Modelo pelo método do sistema em série	16
2.2.2	Modelo pelo método do sistema em paralelo	17
2.2.3	Modelo pelo processo de Markov	18
2.2.4	Modelo pelo método de árvore de falhas	19
2.3	Análise de modos de falha e efeitos	20
2.4	Falhas com causa comum	23
2.5	Modelamento de confiabilidade pelo método de árvore de falhas	24
2.5.1	Definição do evento topo	25
2.5.2	Construção da árvore de falhas	26
2.5.3	Simbologia utilizada na construção de árvores de falhas	27

2.5.4	Avaliação das árvores de falhas	31
2.6	Distribuição utilizada na estimativa de confiabilidade	50
2.7	Tratamento estatístico de dados	52
2.7.1	Levantamento de dados	53
2.7.2	Teste de aderência de dados às distribuições ..	53
3	ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE LINHA DE EIXO DE UM SUBMARINO	63
3.1	Considerações gerais	63
3.2	Descrição do sistema de linha de eixo	64
3.3	Análise de modos de falha e efeitos	69
3.4	Análise de confiabilidade	82
3.4.1	Árvores de falhas	82
3.4.2	Cálculo da disponibilidade	87
3.4.3	Cálculo da disponibilidade média	98
3.5	Atualização bayesiana dos dados de falha	101
3.5.1	Metodologia	103
4	CONCLUSÕES	108
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

Apêndice

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Árvore de falhas com portão "E"	40
Figura 2.2	Árvore de falhas com portão "OU"	41
Figura 2.3	Árvore de falhas com portões "E" e "OU" .	42
Figura 2.4	Árvore de falhas dos cortes mínimos	46
Figura 2.5	Árvore de falhas para um sistema votador 2 de 3	48
Figura 2.6	Curva da taxa instantânea de falhas em função do tempo - "Curva da Banheira" ...	51
Figura 2.7	Curva da taxa instantânea de falhas em função do tempo para componentes mecânicos	51
Figura 2.8	Relatório para obtenção de taxas de falhas	54
Figura 3.1	Esquema básico do sistema de linha de eixo de um submarino típico	66
Figura 3.2	Árvore de falhas referente à operação anormal da linha de eixo	83
Figura 3.3	Árvore de falhas referente à perda da propulsão	84
Figura 3.4	Árvore de falhas reduzida referente à perda da propulsão - caso A (excluindo os mancais do tubo telescópico)	86
Figura 3.5	Árvore de falhas reduzida referente à perda da propulsão - caso B (incluindo os mancais do tubo telescópico)	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Exemplo de tabela de análise de modos de falha e efeitos	23
Tabela 2.2	Simbologia utilizada para portões em árvores de falhas	32
Tabela 2.3	Simbologia utilizada para eventos em árvores de falhas	33
Tabela 2.4	Operações com eventos, operações algébricas e operações booleanas	39
Tabela 2.5	Regras para operações booleanas	39
Tabela 2.6	Tabela das distribuições de χ^2	62
Tabela 3.1	Análise de modos de falha e efeitos da caixa redutora	70
Tabela 3.2	Análise de modos de falha e efeitos do acoplamento flexível	71
Tabela 3.3	Análise de modos de falha e efeitos do mancal de escora	72
Tabela 3.4	Análise de modos de falha e efeitos do acoplamento rígido	74
Tabela 3.5	Análise de modos de falha e efeitos do selo do tubo telescópico	75
Tabela 3.6	Análise de modos de falha e efeitos do eixo propulsor	77
Tabela 3.7	Análise de modos de falha e efeitos do propulsor	78
Tabela 3.8	Análise de modos de falha e efeitos do mancal de vante do tubo telescópico	79

Tabela 3.9	Análise de modos de falha e efeitos do mancal de ré do tubo telescópico	80
Tabela 3.10	Análise de modos de falha e efeitos do tubo telescópico	81
Tabela 3.11	Taxas médias de falhas por unidade de tempo para os componentes da linha de eixo	91
Tabela 3.12	Valores de $(1/\sigma_i)\beta_j$ para os casos A e B..	93
Tabela 3.13	Disponibilidade do sistema de linha de eixo (caso A)	95
Tabela 3.14	Disponibilidade do sistema de linha de eixo (caso B)	96
Tabela 3.15	Disponibilidade média do sistema de linha de eixo (caso A)	100
Tabela 3.16	Disponibilidade média do sistema de linha de eixo (caso B)	101

RESUMO

A análise de confiabilidade utilizando o modelamento de sistemas pelo método de árvore de falhas permite a identificação e eliminação de pontos fracos no projeto. Através da técnica de análise de modos de falha e efeitos, define-se o evento indesejável de interesse para o desenvolvimento da árvore de falhas. O emprego conjunto destas ferramentas possibilita a avaliação qualitativa e/ou quantitativa do sistema analisado.

O presente trabalho detalha estas técnicas e a aplicação para o sistema de linha de eixo de um submarino típico. O evento indesejável identificado foi a perda da propulsão. Dois casos foram analisados: perda da propulsão desconsiderando a falha dos mancais do tubo telescópico e perda da propulsão incluindo a falha dos mesmos. Pode-se concluir que a falha destes componentes não afeta significativamente a disponibilidade do sistema.

Outro aspecto abordado foi a influência da forma da distribuição do tempo de vida dos componentes no valor da disponibilidade. Através da variação dos parâmetros da distribuição de Weibull, aplicável a componentes mecânicos, pode-se concluir que esta influência não é relevante. Isto implica na possibilidade de utilização da distribuição exponencial para os tempos de vida dos componentes.

Os valores obtidos para a disponibilidade do sistema foram extremamente baixos. A mais importante restrição quanto aos resultados reside na falta de credibilidade nas taxas de falha envolvidas. Os dados são escassos e, quando disponíveis, não fornecem informações de como foram obtidos e para que condições se aplicam.

Foi apresentado o método bayesiano para atualização e especialização dos dados de falha. Aponta-se, finalmente, que é necessária a conscientização da importância do registro e acúmulo de dados, através da formação de um banco de dados de falhas.

"ABSTRACT"

The reliability analysis using the fault tree method for modelling systems allows the identification and exclusion of weak points during the design stage. By the use of the failure modes and effects analysis technique, the undesired event for the development of the fault tree can be stated. The employment of these tools, together, permits the qualitative and/or quantitative evaluation of the system to be analyzed.

This work details these techniques and their application to a typical submarine shafting system. The defined undesired event under consideration has been the loss of propulsion. Two cases have been analyzed: loss of propulsion disconsidering the failure of the stern tube bearings and loss of propulsion including their failure. It can be concluded that the failure of these components does not affect substantially the system availability.

Another important aspect treated has been the influence of the shape of the distribution of the component life time to the availability. It can be stated that this influence is not relevant, by varying the parameters of the Weibull distribution, applicable to mechanical equipment. This means that the exponential distribution can be utilized for representing the life time of the components.

The values obtained for the system availability were extremely low. The most important restriction of these results is related to the lack of belief on the failure rates used in the analysis. There are too few failure data about the components, and even the available ones are not specified on how they have been obtained and to which condition they can be applied.

It has been presented the bayesian approach for updating and specializing failure data. Finally, it is pointed out that it is necessary to create a conscious feeling of the importance in acquiring and reporting failure data, in order to develop a failure data bank.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Definição do problema

Um estudo de confiabilidade baseia-se nas ocorrências aleatórias de falhas ou eventos indesejáveis durante a vida de um determinado sistema ou equipamento.

Quando se fala em confiabilidade, deve-se fazer distinção entre os conceitos de confiabilidade e qualidade, algumas vezes usados de forma incorreta. Apenas como exemplo deste equívoco, pode-se citar o abuso cometido por JURAN e FRANK (1991) ao apresentarem a seguinte definição: "A qualidade é a ausência de falhas".

Em realidade, a ausência de falhas caracteriza a confiabilidade, quer seja para sistemas, equipamentos ou componentes. Deve ser claramente compreendido que qualidade de um produto é um conceito abrangente que implica na conformidade com requisitos e especificações a serem seguidos durante o projeto. Estes devem satisfazer as necessidades impostas pelo cliente, enquanto confiabilidade de um produto é a probabilidade do mesmo desempenhar adequadamente a função para a qual foi projetado, durante um intervalo de tempo especificado, sob condições ambientais e operacionais pré-estabelecidas.

Convém salientar que confiabilidade pode e deve ser um requisito para tentar garantir a qualidade de um produto.

Import.
Indissociável ao conceito de confiabilidade, encontra-se o problema em definir o que é desempenho adequado do produto, como considerar sua degradação com o tempo e como conceituar falha. Falhas catastróficas são facilmente detectadas, porém, quando ocorre uma deterioração gradual do sistema, onde os estados de sucesso ou falha tornam-se extremamente próximos, fica difícil identificar a falha. Para a solução deste problema, é fundamental o bom senso do analista na definição das funções e dos diversos modos de falha do produto. A partir disso, quantifica-se a confiabilidade através de métodos probabilísticos.

A confiabilidade de um sistema é um atributo inerente ao mesmo, estabelecida durante o projeto e que não pode ser melhorada a menos que sejam implementadas alterações no projeto.

difícil / atual
A área de confiabilidade não apresenta uma gama de referências tão numerosa quanto outras áreas da engenharia por ser mais recente. Exige conhecimento dos conceitos e da filosofia de confiabilidade, que não são rotineiramente empregados. Isto ocorre principalmente no Brasil, onde empresas que desenvolvem produtos para os quais a análise de confiabilidade é extremamente desejável e, às vezes,

imprescindível, não a elaborem por não possuírem uma equipe capacitada para tal.

Outra consideração importante a ser observada em uma análise de confiabilidade é a relação custo/benefício resultante de melhorias necessárias ao aumento da confiabilidade do componente em estudo. Quando exige-se alta confiabilidade de um sistema, tem-se, em contrapartida, um aumento no seu custo. Assim, a decisão de se fixar um requisito bastante restritivo quanto à confiabilidade, depende dos objetivos a serem atingidos e dos investimentos disponíveis. (Pode-se chegar à conclusão de que o custo para se obter um alto grau de confiabilidade não se justifica devido à natureza da aplicação.) Um exemplo real de tal consideração foi apresentado por AVEN (1989), onde mostrou-se que os custos envolvidos para aumentar a disponibilidade do sistema de prospecção de petróleo em uma plataforma eram bastante superiores aos benefícios advindos desta. Mostrou-se, também, que os prejuízos decorrentes da indisponibilidade do sistema não eram tão significativos, pois a produção sofria apenas um retardo.

1.2 Revisão bibliográfica de aplicações de análise de confiabilidade

Aplicações

A necessidade da quantificação de confiabilidade foi primeiramente notada na indústria aeronáutica após a Primeira Guerra Mundial com o aumento do tráfego aéreo,

quando observou-se uma crescente ocorrência de acidentes com aeronaves e de vôos sem sucesso.

A formulação de modelos matemáticos de confiabilidade começou na Alemanha durante a Segunda Guerra Mundial com o desenvolvimento dos mísseis V-1. A primeira série deles apresentava baixa confiabilidade. Alguns explodiram na base de lançamento e os restantes caíram no Canal Inglês. Foi então chamado o matemático Robert Lusser para prestar consultoria. Lusser, considerado o pai da Engenharia de Confiabilidade, observou que, para sistemas em série, não se aplicava a regra de que uma corrente nunca é mais forte do que seu elo mais fraco. Assim, ele determinou a lei para componentes em série que estabelece que a confiabilidade de um sistema é igual ao produto da confiabilidade de cada componente. Portanto, a confiabilidade dos componentes deve ser bastante superior à do sistema para assegurar seu desempenho adequado.

Neste período, nos Estados Unidos, os esforços para aumentar a confiabilidade centravam-se na melhoria da qualidade, tentando ampliar a vida útil de partes ou do sistema como um todo, através de projetos melhores, materiais mais resistentes, instrumentos de inspeção mais avançados, etc.. Como exemplo, sabe-se que a vida de motores diesel foi bastante estendida por meio do desenvolvimento do processo de endurecimento das superfícies dos mancais dos eixos de manivelas e de cames.

Foram feitos avanços nos projetos visando facilidades para manutenção corretiva e técnicas e planejamento para manutenção preventiva. O interesse gerencial na qualidade dos produtos e no controle e inspeção da produção marcou a entrada da engenharia industrial no campo da confiabilidade, tendo, como resultado, cursos na área de inspeção e controle da qualidade, associados a técnicas estatísticas.

Na década de 50 foi dada crescente importância à área de segurança, principalmente nos campos da indústria aeroespacial e de energia nuclear. Começou nesta década o uso da confiabilidade em termos de taxa de falha, esperança de vida, adequação do projeto e predição de sucesso.

Durante a Guerra da Coréia, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos constatou que equipamentos não confiáveis requeriam uma quantidade absurda de manutenção. Concluiu-se, então, que era mais econômico considerar os requisitos de confiabilidade durante o projeto, do que arcar com os custos de reparos após as falhas dos equipamentos.

Ainda no princípio da década de 50 iniciou-se o estudo de falhas humanas e sua contribuição à falha de sistemas, que passaram, então, a ser incorporadas como eventos nas equações de confiabilidade, juntamente com outros aspectos operacionais. Foi desenvolvido um estudo de um sistema de

armamento nuclear para aeronaves, usando no método a compilação de estimativas de taxas de erros humanos. O ambiente de operação também foi levado em consideração. Chegou-se a taxas de erros humanos consideravelmente maiores em ambientes onde os operadores estavam sujeitos a tensões. Exemplo disso foi a taxa obtida para pilotos quando voando, que foi o dobro da taxa de erros humanos em terra.

Neste período, teve início, também, o desenvolvimento da técnica de análise de modos de falha e efeitos (*FMEA - Failure Modes and Effects Analysis*) na indústria aeroespacial.

Na década de 60 houve o aparecimento de novas técnicas de confiabilidade e de uma larga gama de aplicações especializadas. Foi dada ênfase ao efeito das falhas dos componentes sobre os sistemas dos quais faziam parte. A era dos mísseis balísticos intercontinentais e dos foguetes tripulados fez com que crescesse a utilização dessas técnicas, aumentando a chance de sucesso dessas aplicações. Durante os chamados **anos espaciais**, foram cuidadosamente testados componentes e sistemas, sendo registrado cada modo de falha, sua análise e suas causas. Os efeitos de cada falha eram avaliados para aplicação de ações corretivas, de forma a impedir novas ocorrências (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, INC., 1963).

Foi desenvolvida a análise de sistemas através de diagramas de confiabilidade, usados extensivamente como modelos de sucesso para atingir metas de segurança e confiabilidade (RESEARCH TRIANGLE INSTITUTE, 1964).

Devido à crescente complexidade de diagramas de confiabilidade, foi necessário criar um novo método. Em 1961 surgiu o conceito de análise de árvore de falhas elaborado por H. A. Watson da Bell Telephone Laboratories. Mais tarde a Boeing Company modificou o conceito de forma a implementar sua utilização em computadores. Em 1965, D. F. Haasl desenvolveu a técnica de construção de árvores de falhas e sua aplicação em diversos problemas de segurança e confiabilidade.

O primeiro estudo independente de segurança de sistemas foi solicitado em 1962 pela Força Aérea Americana após quatro desastres em complexos de mísseis. Em 1966 o Departamento de Defesa dos Estados Unidos adotou os padrões da Força Aérea e começou a requerer estudos de segurança em todas as fases de desenvolvimento de seus projetos. Paralelamente, foram introduzidos requisitos de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade para equipamentos.

Os anos 60 presenciaram o início da ainda crescente produção de publicações na área de confiabilidade; exemplo foi a criação do IEEE Transactions on Reliability, considerada a publicação mais importante na área.

Matemáticos importantes como: Z. W. Birnbaum, R. Barlow, F. Proschan, J. Esary e W. Weibull lideraram o desenvolvimento de técnicas estatísticas avançadas para solução de problemas de confiabilidade e manutenibilidade (BARLOW, 1965, 1969).

Durante a Guerra da Coréia, na década de 50, apenas 30% dos equipamentos eram usados com sucesso. Na década de 60 chegou-se a um índice de utilização bem sucedida de 70%. Em 1958, apenas 28% dos lançamentos de satélites nos Estados Unidos cumpriam sua missão; em 1962 este índice subiu para 83%. Na indústria automobilística, pôde-se notar o avanço nesta área, uma vez que a **garantia de fábrica** dos veículos foi largamente aumentada.

Esta década marcou, também, o início da preocupação da indústria naval com a confiabilidade de seus produtos. Isto teve como finalidade a minimização dos custos envolvidos com a manutenção dos equipamentos e o tempo de reparo dos mesmos, tentando otimizar sua operação. Houve a conscientização da necessidade da formação de um banco de dados de confiabilidade para equipamentos navais, uma vez que as bases existentes não eram adequadas para essa aplicação (WOODWARD, 1963; RIDDICK, HARRINGTON, 1964).

A década de 70 ficou marcada pela análise de risco de usinas nucleares que culminou na publicação, em 1975, do Relatório "WASH 1400, The Rector Safety Study" (USNRC,

1975). Foi analisado um vasto espectro de possíveis acidentes nucleares, sua colocação em ordem de probabilidade de ocorrência e suas conseqüências potenciais para a população. As técnicas de árvore de eventos, árvore de falhas e risco-conseqüência utilizadas no estudo, foram adotadas de forma abrangente pela indústria, principalmente no setor químico (FUSSELL, 1977).

Após os acidentes de Flixborough na Inglaterra e Cervesa na Itália, que levantaram a reação da população com relação aos riscos das indústrias em geral, houve a introdução de requisitos de análise de risco na legislação, precedendo à construção de novas plantas.

Em 1979, após o acidente com a usina de Three Mile Island (TMI), os métodos de avaliação de risco ganharam impulso nos Estados Unidos. Foi reconhecida a validade dos resultados, anteriormente contestados, do Relatório WASH 1400.

Ainda em 1979, foi publicado na Alemanha um estudo de risco das usinas nucleares e suas conseqüências para a população alemã. Este estudo foi elaborado utilizando uma metodologia probabilística semelhante à do WASH 1400, chegando às mesmas conclusões deste.

Sob os efeitos negativos causados pelo acidente de TMI, os anos 80 foram marcados pela crescente realização de

análises probabilísticas de segurança para as usinas nucleares de todo o mundo. Isto serviu como uma forma de avaliação do nível de segurança operacional das mesmas.

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) definiu, em 1983, um programa para realização de um estudo probabilístico de segurança para a Central Nuclear de Angra-I, conjuntamente com a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA); seus resultados foram apresentados em 1984. Em 1989 a CNEN requereu a elaboração de uma nova análise probabilística de segurança para Angra-I, a fim de conceder a autorização para operação permanente após o recarregamento da usina.

Com o acidente ocorrido na usina de Tchernobyl, em 1986, houve uma concentração de esforços no sentido de avaliar as condições de segurança das usinas nucleares no mundo.

De uma maneira geral, pode-se concluir que houve uma contribuição distinta de cada ramo da ciência para o avanço das técnicas de análise. A engenharia de uma maneira geral e, principalmente, aquela associada à indústria química, colaborou com a sólida e bem fundada experiência prática. As ciências ligadas à área espacial contribuíram com o extensivo processo de pesquisa, qualificação e testes de sistemas. Por último, a engenharia nuclear, com embasamento das ciências estatísticas, desenvolveu a metodologia integrativa e quantitativa de confiabilidade, mostrando

avanço no tratamento de dados, no modelamento de interação de sistemas e na análise de incertezas.

1.3 Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho é apresentar a metodologia para análise de confiabilidade de sistemas através do desenvolvimento do modelo de árvores de falhas, visando sua aplicação prática a um sistema de linha de eixo de submarinos.

A elaboração da análise de confiabilidade para tal sistema justifica-se pelo próprio propósito do tipo de embarcação em questão. O cumprimento de qualquer missão imposta a submarinos, exige a disponibilidade do sistema de propulsão como um todo e, em especial, da linha de eixo. A manutenção da capacidade de locomoção da embarcação é um aspecto de vital importância no sucesso das missões especificadas. Portanto, deve-se exigir um alto nível de confiabilidade para o sistema de linha de eixo de forma a garantir sua disponibilidade durante todos os perfis de missão, já que não podem ser executadas manutenções corretivas durante a realização dos mesmos.

O desenvolvimento do trabalho compreende os capítulos descritos a seguir.

O capítulo 2 apresenta os fundamentos da teoria de confiabilidade, mostrando os possíveis modelos para análise e o método para elaboração da análise de modos de falha e efeitos (AMFE). Serão detalhados: o modelo de confiabilidade utilizando árvore de falhas e o método para tratamento estatístico de dados de falha.

O capítulo 3 contém a aplicação da metodologia de análise de confiabilidade a um sistema de linha de eixo de submarinos, incluindo a análise de modos de falha e efeitos do sistema e a elaboração da árvore de falhas. Este capítulo aborda, ainda, a atualização bayesiana dos dados de falha através da utilização de dados obtidos na prática.

O capítulo 4 relata, concisamente, as conclusões do trabalho.

2 FUNDAMENTOS DA TEORIA DE CONFIABILIDADE

2.1 Considerações gerais

A principal meta a ser atingida através da análise de confiabilidade é a redução da probabilidade de falha do sistema em estudo, com conseqüente diminuição de riscos que possam causar danos a pessoas, ao ambiente e à economia de uma maneira geral.

Danos a pessoas envolvem morte, invalidez e doenças. Danos ao ambiente envolvem poluição do ar e dos meios líquidos e outros tipos de degradação, como: odores, vibração e ruído. Danos à economia podem ser traduzidos, por exemplo, pela perda de equipamentos, produção de serviços e/ou produtos fora de especificação, interrupção de serviços e da produção, etc..

Os danos ocorrem quando um ou mais eventos básicos de falha, combinados, levam à concretização do risco. Os três tipos de eventos básicos de falha de sistemas mais comumente encontrados são:

a) eventos relacionados a falhas humanas, como: erro do operador, erro de projeto, erro de manutenção, etc.;

b) eventos relacionados à operação dos equipamentos, como: vazamento de fluidos tóxicos através de válvulas, perda de lubrificação de motores, medição incorreta de sensores, etc.; e

c) eventos relacionados com o meio ambiente, como: terremotos, inundações, tornados, descargas elétricas, etc..

Podem ser adotadas algumas medidas com a finalidade de minimizar a ocorrência dos três tipos de eventos citados, tais como: utilização de equipamentos redundantes, instalação de dispositivos de proteção (por exemplo: *sprinklers*, válvulas de alívio, portas corta-chamas, sistemas de resfriamento de emergência, alarmes, etc.), inspeções periódicas e manutenção preventiva.

A função principal da análise de confiabilidade é identificar a inter-relação causal entre os eventos básicos que levam à falha do item, procurando diminuir seu impacto por meio de alterações no projeto. Estas relações causais podem ser desenvolvidas através de árvores de falhas, analisadas qualitativa e quantitativamente. Após a combinação dos eventos básicos de falha que levam aos riscos, pode-se implementar melhorias no projeto de forma a tentar diminuí-los.

2.2 Modelamento de confiabilidade

Quando pensa-se em confiabilidade de um sistema, deve-se analisar a inter-relação entre os componentes que o integram e seus efeitos na confiabilidade como um todo. Por exemplo: supondo um sistema composto de dois componentes com confiabilidade R_1 e R_2 , qual a confiabilidade do sistema? É o produto de R_1 e R_2 ? É a média de R_1 e R_2 ? É o valor mínimo deles? É uma outra função qualquer? A resposta dependerá da relação funcional entre os componentes e dos efeitos probabilísticos do comportamento dos mesmos no sistema. Esta resposta será determinada através do modelamento de confiabilidade do sistema.

A análise de confiabilidade de sistemas pode ser desenvolvida através de modelamentos diversos. Existem modelos de confiabilidade estáticos, onde a confiabilidade do equipamento analisado é suposta constante, ou seja, independente do tempo, e modelos de confiabilidade dinâmicos, onde a confiabilidade do equipamento varia com o tempo.

No caso de sistemas mecânicos, a confiabilidade é decrescente no tempo devido a fatores intrínsecos aos componentes, tais como: desgaste, corrosão, fadiga do material, etc., assim, devem ser utilizados modelos de confiabilidade dinâmicos.

Serão mencionados a seguir, alguns modelos dinâmicos para análise de confiabilidade.

2.2.1 Modelo pelo método do sistema em série

Um modelo usualmente utilizado é o do sistema em série, onde todos os componentes do sistema têm que funcionar para que o sistema opere com sucesso. Sistemas complexos são, às vezes, subdivididos em um arranjo em série para facilidade de análise, por meio do agrupamento adequado de componentes em unidades, de tal forma que estas se comportem como uma série.

Seja:

t_i : a variável aleatória do tempo para falha do $i^{\text{ésimo}}$ componente;

$R_s(t)$: a confiabilidade do sistema;

n : o número de componentes do sistema; e

$\text{Pr}(\dots)$: a probabilidade de um dado evento.

A confiabilidade do sistema é dada por:

$$R_s(t) = \text{Pr}[t_1 > t \cap t_2 > t \cap \dots \cap t_n > t] \quad (2.1)$$

Admitindo que os eventos são mutuamente exclusivos, tem-se:

$$R_s(t) = \text{Pr}(t_1 > t) \cdot \text{Pr}(t_2 > t) \cdot \dots \cdot \text{Pr}(t_n > t) \quad (2.2)$$

Mas:

$$R_i(t) \equiv \Pr(t_i > t) \quad (2.3)$$

Logo:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2.4)$$

Em que, $R_i(t)$ é a confiabilidade do $i^{\text{ésimo}}$ componente.

2.2.2 Modelo pelo método do sistema em paralelo

Outro tipo de modelo é o de sistema em paralelo, onde existem componentes duplicados ou modos alternativos que garantam a operação do sistema. O sistema puramente em paralelo é aquele em que basta um dos componentes do sistema estar funcionando para que o sistema opere com sucesso.

Seja:

$F_s(t)$: não-confiabilidade do sistema, ou seja, o complementar da confiabilidade. Utiliza-se a não-confiabilidade, uma vez que para sistemas com componentes puramente em paralelo trabalha-se diretamente com o produto desses parâmetros.

A não-confiabilidade neste caso é dada por:

$$F_s(t) = \Pr[t_1 < t \cap t_2 < t \cap \dots \cap t_n < t] \quad (2.5)$$

Admitindo que os eventos são mutuamente independentes, tem-se:

$$F_s(t) = \Pr(t_1 < t) \cdot \Pr(t_2 < t) \cdot \dots \cdot \Pr(t_n < t) \quad (2.6)$$

Como:

$$\Pr(t_i < t) = 1 - R_i(t) \quad (2.7)$$

Resulta:

$$F_s(t) = \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (2.8)$$

2.2.3 Modelo pelo processo de Markov

Um processo de Markov é um processo estocástico no qual, a qualquer instante de tempo, o estado subsequente do processo é afetado apenas pelo estado no dado instante, não dependendo das características do processo em instantes anteriores. Assim, a precisão em prever o futuro do processo aleatório não depende do conhecimento ou dos dados do comportamento passado do processo. Processos sem memória, que podem ser considerados markovianos, são utilizados na prática para representar sistemas de

engenharia, através da escolha correta das variáveis de processo.

A elaboração de modelos pelo processo de Markov é bastante complexa, principalmente quando os sistemas em análise passam por muitos estados, tornando o seu desenvolvimento matemático de difícil solução.

2.2.4 Modelo pelo método de árvore de falhas

O método de árvore de falhas é um processo de análise dedutiva, em que procura-se levantar todos os possíveis eventos que levam à ocorrência do evento indesejável, objetivo da análise. Para a elaboração deste modelo é necessário o conhecimento detalhado do sistema a ser analisado. Este método consiste numa representação gráfica e lógica das combinações de possíveis eventos relevantes para a ocorrência do evento indesejável.

A importância da utilização de árvore de falhas pode ser reconhecida por diversos fatores:

- a) direciona a análise para a procura de todas as possíveis falhas do sistema em questão;
- b) identifica os aspectos do sistema importantes para as falhas de interesse;

- c) fornece uma ajuda gráfica, tornando visível as alterações de projeto aos gerentes de sistemas;
- d) fornece opção de escolha de análise de confiabilidade apenas qualitativa e/ou quantitativa;
- e) permite ao analista concentrar-se em uma dada falha particular do sistema por vez; e
- f) permite uma visão do comportamento do sistema.

A apresentação deste modelo é o objetivo principal do trabalho, sendo melhor detalhado ainda neste capítulo.

2.3 Análise de modos de falha e efeitos

A análise de modos de falha e efeitos (AMFE) é uma técnica de análise indutiva que tem o propósito de identificar, sistematicamente, todos os diferentes modos de falha que possam ocorrer aos componentes e subsistemas de um sistema em análise. Deve, também, avaliar as causas, os efeitos e conseqüências de tais falhas.

É um processo que envolve uma análise formal, a fim de determinar o efeito dessas falhas nos demais componentes e no desempenho global do sistema, identificando se os requisitos e/ou objetivos previstos para o mesmo estão sendo satisfeitos. É normalmente aplicada durante as fases

de projeto conceitual e de desenvolvimento. A finalidade é assegurar que todos os possíveis modos de falha foram considerados e que as alterações necessárias foram incorporadas no projeto, ou no modo de operação, para eliminar as causas de falhas ou diminuir o efeito das mesmas a um nível aceitável.

Apesar da AMFE poder ser sempre utilizada como ferramenta de auxílio ao projeto, ela é imprescindível na elaboração da análise de confiabilidade. Para desenvolver a árvore de falhas de um sistema, é necessário conhecer detalhadamente seu funcionamento e que tipos de falha podem ocorrer. Assim, a execução da AMFE deve ser feita preliminarmente à análise de confiabilidade, assegurando que não serão omitidas falhas relevantes para esta.

A AMFE é feita através da elaboração de uma tabela contendo basicamente as seguintes informações:

- a) identificação do componente: indica o número (*tag*) do componente analisado, a fim de permitir sua localização no sistema/fluxograma;
- b) descrição do componente: indica o tipo de componente e suas características principais;
- c) função do componente;

d) modo de falha: indica como o componente pode falhar; devem ser levantados todos os possíveis modos de falha para um dado componente; assim, esta coluna poderá ser subdividida em tantos quantos forem os modos de falha;

e) causa da falha: indica qual o motivo que causou a falha; está sempre associada a um modo de falha;

f) efeitos:

f.1) no local e/ou em componentes adjacentes: indica quais os efeitos que poderão ocorrer no local e/ou em outros componentes próximos;

f.2) no sistema: indica quais os possíveis efeitos no funcionamento do sistema;

f.3) em outros sistemas: indica, quando houver, possíveis efeitos em outros sistemas;

g) método de detecção: indica como a falha pode ser detectada, quer seja pela instrumentação do sistema, quer seja por inspeção, etc.; e

h) recursos para compensação: indica se existem meios para atenuar ou contornar tais modos de falha.

Um esquema da tabela de AMFE é apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Exemplo de tabela de análise de modos de falha e efeitos

Identi- ficação do Compo- nente	Descri- ção do Compo- nente	Função do Compo- nente	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeitos			Método de Detec- ção	Recur- sos para Compen- sação
					No local	No sistema	Noutros siste- mas		

Com esta tabela à disposição, percebe-se claramente quais os eventos que devem entrar na árvore de falhas do sistema em análise.

2.4 Falhas com causa comum

Falhas com causa comum são aquelas em que vários componentes ficam impossibilitados de desempenhar suas funções devido a um único evento ou causa. Estas falhas são causadas por eventos como choque, sobreaquecimento, tensões anormais, incêndios, terremotos, etc..

A existência de falhas com causa comum pode anular os benefícios das redundâncias empregadas nos sistemas e inutilizar os resultados da análise de confiabilidade usual, em que, na maioria das vezes, são consideradas apenas falhas simples. Entenda-se por redundância a

existência de um ou mais meios alternativos que permitam ao sistema desempenhar suas funções satisfatoriamente, quando o meio principal se tornar indisponível.

É intuitivo que existem diversas falhas com causa comum, mesmo em sistemas simples e que a identificação de todas é muito difícil. Qualquer propriedade em comum para componentes introduz dependências entre eles e pode resultar neste tipo de falha.

Várias podem ser as causas para estas falhas, tais como: projeto deficiente, defeitos funcionais, erros de manutenção, ambiente externo, etc..Assim, para tentar diminuir a ocorrência de falhas com causa comum, algumas medidas podem ser adotadas, como: utilização de diferentes tipos de equipamentos, diferentes maneiras para monitorar o estado do sistema, fabricantes distintos para equipamentos semelhantes ou iguais, componentes redundantes fisicamente separados, mais de um operador para rever ações humanas, etc..

Resumindo, este aspecto deve sempre ser considerado durante a elaboração de uma análise de confiabilidade.

2.5 Modelamento de confiabilidade pelo método de árvore de falhas

Árvore de falhas é uma ferramenta muito importante, pois identifica acidentes potenciais durante o projeto de

sistemas, ajudando a eliminar mudanças dispendiosas ou futuros reprojatos. Permite, também, prever as causas mais prováveis de falhas nos sistemas.

Dependendo do escopo da análise de confiabilidade, a árvore de falhas pode ter uma avaliação qualitativa ou também quantitativa. Se o propósito da análise é a identificação das falhas que possam ocorrer ao sistema, a avaliação apenas qualitativa é suficiente. Porém, se o propósito é a determinação das características de confiabilidade do sistema, como: indisponibilidade média, confiabilidade, etc., a avaliação quantitativa é imprescindível.

Quando construída adequadamente, a árvore de falhas leva à descoberta de eventos e/ou combinações de eventos importantes que não seriam normalmente identificados como causas do evento indesejável analisado. É uma ferramenta visual bastante utilizada para comunicação, sendo suporte para decisões sobre a análise do sistema.

2.5.1 Definição do evento topo

O modelo de árvore de falhas parte de um evento indesejável e procura possíveis causas que levem a esse evento. Tal evento é chamado de evento topo e é o passo inicial na construção da árvore.

A escolha do evento topo depende do aspecto a ser analisado no sistema. Para um dado sistema, pode-se identificar muitos riscos distintos, e, dentre estes, escolher qual é o relevante para análise, classificando-o como evento topo. A partir desse evento desenvolve-se a árvore através da busca de causas para o mesmo.

2.5.2 Construção da árvore de falhas

A meta na construção da árvore de falhas é modelar gráfica e logicamente as condições do sistema que resultem no evento indesejável. Para que isso seja possível, é necessário que o analista tenha conhecimento profundo do sistema, sendo parte indispensável da documentação para análise a descrição do mesmo. Para que a análise possa ser compreendida por terceiros, é imprescindível que quem a execute, registre claramente as hipóteses adotadas e os limites espacial e temporal admitidos para o sistema durante a elaboração da árvore.

A árvore de falhas é estruturada de forma que a seqüência de eventos que leva ao evento indesejável é representada abaixo do evento topo e é relacionada a este através de portões lógicos (do tipo "OU", "E", etc.). Os eventos de entrada de cada portão lógico são também eventos de saída de portões lógicos de níveis inferiores, que são desenvolvidos até chegar aos eventos terminais da árvore, chamados de eventos básicos. Estes representam o limite de

resolução da árvore e são as causas de interesse para que o evento indesejável ocorra.

Todo sistema a ser analisado é formado por componentes e materiais interagindo com os operadores e com o ambiente físico que o envolve. Além disso, está sujeito a desgaste e envelhecimento. Os riscos ocorrem quando um, ou um conjunto de componentes falham. O ambiente, os operadores e o envelhecimento podem afetar o sistema apenas através de seus componentes. Estes relacionam-se entre si de forma específica, sendo que componentes idênticos podem apresentar características diferentes em sistemas diferentes. Assim, é necessário definir claramente a inter-relação entre os componentes e a dinâmica do sistema. Estes podem ser identificados através da análise dos fluxogramas de processo e de engenharia, da descrição do sistema, da localização física dos componentes, dos acoplamentos, etc.. Após o perfeito entendimento da inter-relação entre os componentes e da dinâmica do sistema, pode-se partir para a elaboração da árvore de falhas, fazendo o levantamento e a combinação de falhas relevantes para a análise.

2.5.3 Simbologia utilizada na construção de árvores de falhas

De forma a visualizar as relações causais através de árvores de falhas, é necessário utilizar uma simbologia de diagrama de blocos para classificar e conectar os eventos.

Existem dois grupos de símbolos: símbolos para portões e símbolos para eventos.

2.5.3.1 Símbolos para portões

Os portões conectam eventos de acordo com sua relação causal, portanto, para cada tipo de relação existe um símbolo de portão representativo. Cada portão pode ter uma ou mais entradas, porém, apenas uma saída.

A Tabela 2.2 mostra os símbolos utilizados para representar os portões nas árvores de falhas. O portão "OU" representa a relação de que a saída ocorrerá se qualquer uma das entradas ocorrer. O portão "E" representa a relação de que a saída só ocorrerá se todas as entradas ocorrerem.

A relação causal expressa pelos portões "OU" e "E" é determinística, pois a ocorrência do evento de saída é totalmente controlada pelos eventos de entrada. Existem, porém, relações causais que são probabilísticas. Por exemplo: a relação entre "uma pessoa sofrer um acidente" e "uma pessoa morrer" é probabilística, pois nem todos os acidentes são fatais; existe uma porcentagem de acidentes fatais e uma porcentagem de acidentes não fatais e é esse o fator não determinístico. Para esses casos existe o portão inibidor que representa a relação probabilística. O evento de entrada fica localizado no extremo inferior do portão e o evento condicional fica localizado na lateral do portão.

O evento de saída ocorrerá se ocorrerem o evento de entrada e o evento condicional. Em outras palavras, o evento de entrada levará ao evento de saída com a probabilidade de ocorrência do evento condicional. Este portão pode ser substituído por conveniência por um portão "E".

O portão "E com prioridade" é equivalente a um portão "E" com o requisito adicional de que os eventos de entrada têm que ocorrer numa ordem específica. O evento de saída ocorrerá se ocorrerem os eventos de entrada da esquerda para a direita. Caso ocorram todos os eventos de entrada, porém, numa ordem diferente desta, o evento de saída não irá ocorrer.

O portão "OU exclusivo" descreve uma situação onde o evento de saída ocorrerá se apenas um dos eventos, não ambos, ocorrer. Este portão pode ser substituído pela combinação de um portão "E" e um portão "OU".

O portão "m de n" é um portão que representa uma lógica de votação onde o evento de saída ocorrerá se, pelo menos, "m" dos "n" eventos de entrada ocorrerem.

2.5.3.2 Símbolos para eventos

A Tabela 2.3 mostra os símbolos utilizados para os eventos das árvores de falhas.

Na literatura sobre análise de confiabilidade, alguns símbolos diferem dos aqui apresentados, porém, optou-se pela utilização dos símbolos em uso atualmente.

Eventos representados por retângulos expressam eventos de falha resultantes da combinação de outros eventos de falha cuja relação é identificada pelos portões lógicos. O próprio evento topo é assim representado.

O retângulo com um pequeno círculo na extremidade inferior denota o evento básico de falha no âmbito considerado. O evento básico representa o limite de resolução da árvore de falhas e, na maioria das vezes, denota a falha dos componentes do sistema em análise, por exemplo: válvula falha para abrir. Geralmente, é um evento que o próprio componente, e, somente ele é atingido, que quando ocorre, necessita de reparo ou substituição.

O losango representa um evento não desenvolvido. Caso seja necessário desenvolvê-lo, substitui-se o losango por um retângulo, continuando a análise até chegar aos eventos básicos.

O símbolo ovalizado é utilizado para representar eventos condicionais ligados aos portões inibidores.

O símbolo que assemelha-se a uma casa representa um evento disparador. Algumas vezes, deseja-se examinar casos

especiais de árvores de falhas, forçando alguns eventos a ocorrerem e outros não. O evento disparador tem esse efeito. Ele pode assumir o valor zero ou um. Quando associa-se a ele o valor zero, é como se ele não existisse. Quando associa-se o valor um, ele é considerado.

O par de triângulos representa referências cruzadas. Os dois triângulos sempre possuem a mesma numeração. Eles indicam a transferência de parte da árvore de falhas para outro lugar, na maioria das vezes pela impossibilidade de representar tudo na mesma folha ou para ressaltar alguma parte.

O par de triângulos invertidos indica que parte da árvore tem desenvolvimento análogo a alguma parte já desenvolvida. Para evitar sua repetição, indica-se com um triângulo invertido a parte a ser repetida e com outro triângulo invertido onde haverá a repetição. Esses dois triângulos também devem possuir numeração idêntica.

2.5.4 Avaliação das árvores de falhas

A falha de sistemas pode ocorrer de diferentes maneiras. Cada maneira é chamada de modo de falha do sistema e envolve falhas simples ou múltiplas dos componentes. A fim de reduzir a probabilidade de falhas do sistema, deve-se identificar seus possíveis modos de falha e tentar eliminar

os mais frequentes e/ou aqueles com alta probabilidade de ocorrência.

Tabela 2.2 Simbologia utilizada para portões em árvores de falhas

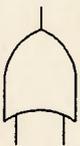
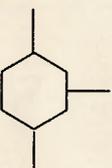
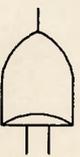
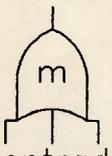
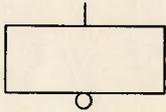
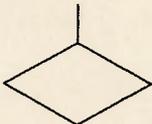
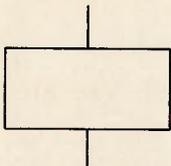
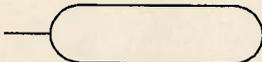
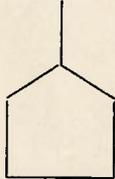
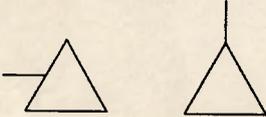
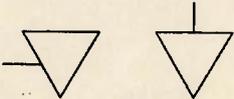
SÍMBOLO DO PORTÃO	NOME DO PORTÃO
	Portão "E"
	Portão "OU"
	Portão "INIBIDOR"
	Portão "E com Prioridade"
	Portão "OU Exclusivo"
 n entradas	Portão "m de n"

Tabela 2.3 Simbologia utilizada para eventos em árvores de falhas

SÍMBOLO DO EVENTO	SIGNIFICADO DO SÍMBOLO
	Evento básico
	Evento não desenvolvido
	Evento de falha com desenvolvimento
	Evento condicional
	Evento disparador
	Símbolo de transferência
	Símbolo que identifica partes com desenvolvimento análogo na mesma árvore

2.5.4.1 Aspectos qualitativos das árvores de falhas

Alguns aspectos qualitativos das árvores de falhas são bastante importantes e revelam informações de interesse para a confiabilidade do sistema em análise.

Um primeiro aspecto importante é o conceito de corte. Para uma dada árvore, seus modos de falha ficam claramente definidos através deste conceito. Um corte é um conjunto de eventos básicos no qual, se todos ocorrerem simultaneamente, é garantido que o evento topo ocorra.

Outro conceito é o de caminho. Um caminho é um conjunto de eventos básicos no qual, se esses eventos não ocorrerem simultaneamente, é garantido que o evento topo não ocorra. Quando o sistema possui apenas um evento topo, a não ocorrência dos eventos básicos de falha de um caminho garante a operação do sistema com sucesso.

Outros dois conceitos importantes são o de corte mínimo e o de caminho mínimo. Corte mínimo é um corte que não pode mais ser reduzido, ou seja, não podem ser retirados mais eventos básicos pois não ocorrerá mais o evento topo. Se for retirado um evento básico de um corte mínimo, os eventos remanescentes deixam de formar um corte. Caminho mínimo é um caminho no qual, se for retirado um evento básico, ele deixa de ser caminho.

Os aspectos qualitativos são importantes uma vez que todos os modos de falha poderiam ser identificados e sanados através da eliminação dos modos definidos nos cortes mínimos.

Uma lista de todos os possíveis cortes mínimos é bastante útil durante o projeto para identificar os pontos fracos do sistema, sugerindo melhorias para o mesmo.

Outro conceito importante é o da dualidade. A árvore de falhas dual é obtida trocando-se os eventos de falha por eventos de sucesso, os portões "OU" por portões "E" e os portões "E" por portões "OU". Os cortes mínimos obtidos para a árvore dual serão os caminhos mínimos da árvore original e os caminhos mínimos da árvore dual serão os cortes mínimos da árvore original. Portanto, se houver disponibilidade de um algoritmo que calcule apenas os cortes mínimos, através da árvore dual pode-se obter os caminhos mínimos. O mesmo vale para um algoritmo que só calcule os caminhos.

2.5.4.2 Aspectos quantitativos das árvores de falhas

Após a identificação dos aspectos qualitativos relevantes para o sistema, pode ser necessário fazer avaliações quantitativas a fim de obter valores numéricos para os parâmetros do mesmo.

Alguns parâmetros importantes são:

- a) Disponibilidade do sistema $A(t)$: é a probabilidade do evento topo não existir no instante t , ou seja, do sistema estar disponível neste instante.
- b) Indisponibilidade do sistema $Q(t)$: é a probabilidade do evento topo existir no instante t , ou seja, do sistema estar indisponível neste instante. A indisponibilidade do sistema é o complemento da disponibilidade. Assim:

$$A(t) + Q(t) = 1 \quad (2.9)$$

Tanto a disponibilidade quanto a indisponibilidade são funções pontuais.

- c) Disponibilidade média do sistema: é a proporção da vida operacional na qual o sistema é capaz de desempenhar a função para a qual foi projetado.
- d) Confiabilidade do sistema $R(t)$: é a probabilidade do evento topo não ocorrer durante o intervalo $(0, t]$. A confiabilidade do sistema requer a não existência contínua do evento topo, portanto, é diferente da disponibilidade. A confiabilidade é geralmente utilizada para caracterizar falhas catastróficas ou irreparáveis do sistema. A seguinte desigualdade sempre se aplica:

$$R(t) \leq A(t) \quad (2.10)$$

e) Não confiabilidade do sistema $F(t)$: é a probabilidade do evento topo ocorrer antes do instante t . A não confiabilidade é o complemento da confiabilidade. Assim:

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (2.11)$$

A seguinte desigualdade sempre se aplica:

$$F(t) \geq Q(t) \quad (2.12)$$

Tanto a confiabilidade como a não confiabilidade são funções de intervalo.

Para a grande maioria dos sistemas, o aspecto quantitativo relevante é a indisponibilidade. Assim, serão apresentados dois métodos para cálculo de indisponibilidade: através de funções de estrutura e através dos cortes mínimos.

2.5.4.2.1 Funções de estrutura ou booleanas

É possível descrever o estado de um evento básico ou do sistema por meio de uma variável binária. Chamando de y_i a variável binária do evento básico B_i , tem-se:

$y_i=1$, quando o evento básico ocorrer, e

$y_i=0$, quando o evento básico não ocorrer.

Da mesma forma, o evento topo está associado a uma variável binária $\Psi(Y)$ relacionada ao estado do sistema através de:

$\Psi(Y)=1$, quando o evento topo ocorrer, e

$\Psi(Y)=0$, quando o evento topo não ocorrer,

onde:

$Y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ é o vetor dos estados dos eventos básicos.

A função $\Psi(Y)$ é conhecida como função de estrutura do evento topo.

As uniões (\cup) e intersecções (\cap) de eventos utilizados para expressar a relação entre eventos, correspondem aos operadores booleanos \vee (OU) e \wedge (E) e às operações algébricas usuais (+ e .) como mostra a Tabela 2.4. Notar que $\Pr(B_i)=E(y_i)$, onde $E(\dots)$ é o valor esperado ou a probabilidade de ocorrência do evento básico B_i .

Os operadores \vee e \wedge estão sujeitos à aplicação das regras da Álgebra Booleana. Estas regras e suas correspondentes representações estão listadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.4 Operações com eventos, operações algébricas e operações booleanas

EVENTO	OPERAÇÕES BOOLEANAS	OPERAÇÕES ALGÉBRICAS	COMENTÁRIOS
B_i	$y_i=1$	$y_i=1$	Evento i ocorre.
\bar{B}_i	$y_i=0$	$y_i=0$	Evento i não ocorre.
$B_i \cap B_j$	$y_i \wedge y_j$	$y_i y_j = 1$	$\Pr(B_i \cap B_j) = E(y_i \wedge y_j)$
$B_i \cup B_j$	$y_i \vee y_j$	$1 - [1 - y_i][1 - y_j] = 1$	$\Pr(B_i \cup B_j) = E(y_i \vee y_j)$
$B_i \cap \dots \cap B_n$	$y_i \wedge \dots \wedge y_n$	$y_i \dots y_n = 1$	$\Pr(B_i \cap \dots \cap B_n) = E(y_i \wedge \dots \wedge y_n)$
$B_i \cup \dots \cup B_n$	$y_i \vee \dots \vee y_n$	$1 - [1 - y_i] \dots [1 - y_n] = 1$	$\Pr(B_i \cup \dots \cup B_n) = E(y_i \vee \dots \vee y_n)$

Tabela 2.5 Regras para operações booleanas

LEIS	INTERPRETAÇÃO ALGÉBRICA
Identidade: $B \vee B = B$ $B \wedge B = B$	$1 - [1 - y][1 - y] = y$ $yy = y$
Leis da Comutação: $B_1 \vee B_2 = B_2 \vee B_1$ $B_1 \wedge B_2 = B_2 \wedge B_1$	$1 - [1 - y_1][1 - y_2] = 1 - [1 - y_2][1 - y_1]$ $y_1 y_2 = y_2 y_1$
Leis Associativas: $B_1 \vee (B_2 \vee B_3) = (B_1 \vee B_2) \vee B_3$ $B_1 \wedge (B_2 \wedge B_3) = (B_1 \wedge B_2) \wedge B_3$	Pode ser escrito como: $B_1 \vee B_2 \vee B_3$ Pode ser escrito como: $B_1 \wedge B_2 \wedge B_3$
Leis Distributivas: $B_1 \wedge (B_2 \vee B_3) = (B_1 \wedge B_2) \vee (B_1 \wedge B_3)$ $B_1 \vee (B_2 \wedge B_3) = (B_1 \vee B_2) \wedge (B_1 \vee B_3)$	
Leis de Absorção: $B_1 \wedge (B_1 \vee B_2) = B_1$ $B_1 \vee (B_1 \wedge B_2) = B_1$	$y_1 y_1 \vee y_2 = y_1 y_2$ $1 - [1 - y_1][1 - y_1 y_2] = y_1$
Definições: $B \wedge 1 = B$ $B \wedge 0 = 0$ $B \vee 0 = B$ $B \vee 1 = 1$	$y \cdot 1 = y$ $y \cdot 0 = 0$ $1 - [1 - y][1 - 0] = y$ $1 - [1 - y][1 - 1] = 1$

2.5.4.2.2 Representação de sistemas em termos de funções de estrutura

Para mostrar a representação de sistemas em termos de funções de estrutura, são admitidos três exemplos: uma árvore com portão "E", uma árvore com portão "OU" e uma árvore com portões "E" e "OU".

a) Árvore com portão "E"

A Figura 2.1 mostra uma árvore com portão "E".

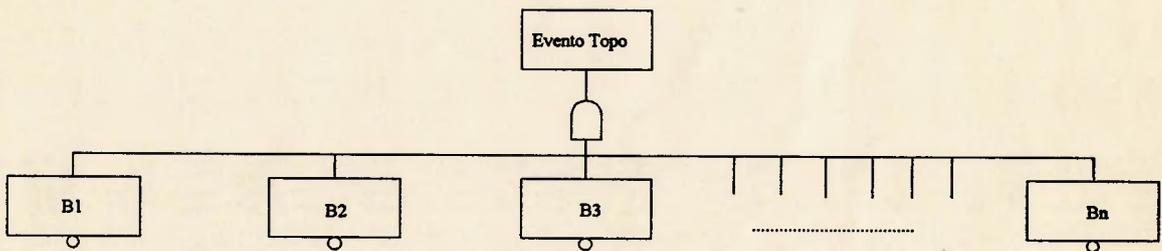


Figura 2.1 Árvore de falhas com portão "E"

O evento topo da Figura 2.1 irá ocorrer se, e somente se, todos os eventos básicos B_1, B_2, \dots, B_n ocorrerem. Em termos de função de estrutura ($\Psi(Y)$), o sistema será dado por:

$$\Psi(Y) = \Psi(y_1, y_2, \dots, y_n) = \bigwedge_{i=1}^n y_i = y_1 \wedge y_2 \wedge \dots \wedge y_n \quad (2.13)$$

onde y_i é a variável binária do evento básico B_i .

A função de estrutura pode ser expressa algebricamente por:

$$\Psi(Y) = \prod_{i=1}^n y_i = y_1 y_2 \dots y_n \quad (2.14)$$

b) **Árvore com portão "OU"**

A Figura 2.2 mostra uma árvore com portão "OU".

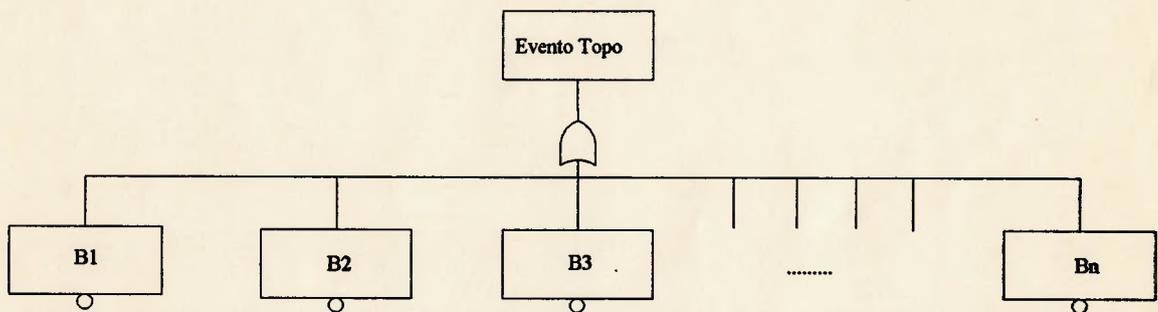


Figura 2.2 **Árvore de falhas com portão "OU"**

O evento topo da Figura 2.2 irá ocorrer se qualquer um dos eventos básicos B_1, B_2, \dots, B_n ocorrer. A função de estrutura ($\Psi(Y)$) para o sistema será:

$$\Psi(Y) = \bigvee_{i=1}^n y_i = y_1 \vee y_2 \vee \dots \vee y_n \quad (2.15)$$

onde y_i é a variável binária do evento básico B_i .

A expressão algébrica será:

$$\Psi(Y) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - y_i] = 1 - [1 - y_1][1 - y_2] \dots [1 - y_n] \quad (2.16)$$

c) **Árvore com portões "E" e "OU"**

A Figura 2.3 mostra uma árvore com portões "E" e "OU".

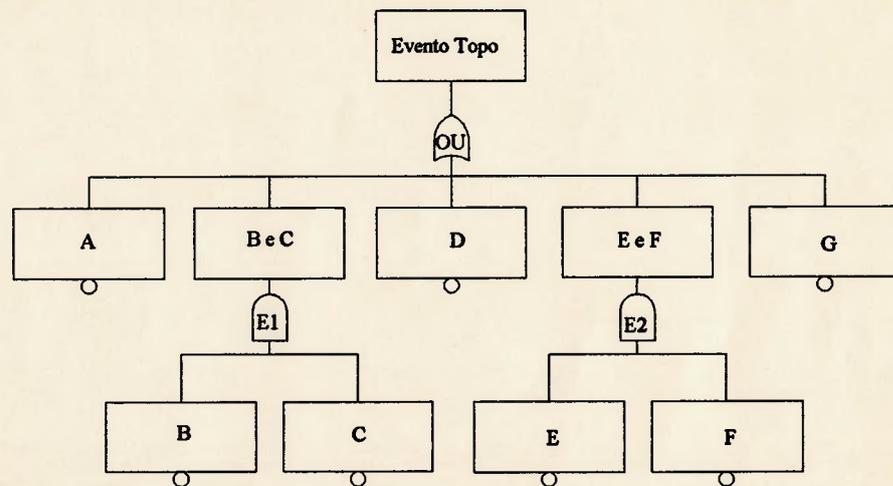


Figura 2.3 **Árvore de falhas com portões "E" e "OU"**

A função de estrutura ($\Psi(Y)$) de árvores de falhas complexas deve ser obtida por passos, ou seja, começa-se pelos portões a nível de evento básico e prossegue-se até o evento topo.

Na árvore da Figura 2.3, começa-se pelos portões "E".

Seja:

Ψ_1 a função de estrutura para o portão E_1 , e

Ψ_2 a função de estrutura para o portão E_2 .

Tem-se:

$$\Psi_1(Y) = Y_B \wedge Y_C = Y_B Y_C \quad (2.17)$$

$$\Psi_2(Y) = Y_E \wedge Y_F = Y_E Y_F \quad (2.18)$$

onde:

Y_B é a variável binária do evento básico B;
 Y_C é a variável binária do evento básico C;
 Y_E é a variável binária do evento básico E; e
 Y_F é a variável binária do evento básico F.

A função de estrutura para a árvore será dada por:

$$\Psi(Y) = Y_A \vee \Psi_1(Y) \vee Y_D \vee \Psi_2(Y) \vee Y_G \quad (2.19)$$

$$\Psi(Y) = 1 - [1 - Y_A] [1 - \Psi_1(Y)] [1 - Y_D] [1 - \Psi_2(Y)] [1 - Y_G] \quad (2.20)$$

$$\Psi(Y) = 1 - [1 - Y_A] [1 - Y_B Y_C] [1 - Y_D] [1 - Y_E Y_F] [1 - Y_G] \quad (2.21)$$

onde:

Y_A é a variável binária do evento básico A;
 Y_D é a variável binária do evento básico D; e
 Y_G é a variável binária do evento básico G.

Assim, pode-se obter a função de estrutura e sua respectiva expressão algébrica de qualquer árvore de falhas, bastando

seguir, passo a passo, o procedimento apresentado, partindo dos eventos básicos e chegando ao evento topo.

2.5.4.2.3 Cálculo da indisponibilidade do sistema através de funções de estrutura

A probabilidade de ocorrência de cada estado dos eventos básicos $y_i=1$ é igual ao valor esperado de y_i e à probabilidade do evento B_i .

$$\Pr(y_i=1)=\Pr(B_i)=E(y_i) \quad (2.22)$$

Esta probabilidade é a indisponibilidade do componente associada ao evento básico B_i . A probabilidade do evento topo, ou seja, a indisponibilidade $Q_S(t)$ é a probabilidade $\Pr(\Psi(Y)=1)$ ou a média $E(\Psi(Y))$. Uma forma alternativa de expressão é:

$$Q_S(t)=\Pr(\text{evento topo})=\Pr(\Psi(Y)=1)=E(\Psi(Y)) \quad (2.23)$$

Como exemplo, a indisponibilidade $Q_S(t)$ para a árvore da Figura 2.3 é dada por:

$$Q_S(t)=E(\Psi(Y)) \quad (2.24)$$

$$Q_S(t)=1-E([1-y_A][1-y_B y_C][1-y_D][1-y_E y_F][1-y_G]) \quad (2.25)$$

Cada fator na expressão do operador E possui diferentes variáveis binárias, porém, esses fatores são independentes uma vez que as variáveis binárias também são independentes. Assim, tem-se:

$$Q_S(t) = 1 - E(1 - Y_A)E(1 - Y_B Y_C)E(1 - Y_D)E(1 - Y_E Y_F)E(1 - Y_G) \quad (2.26)$$

$$Q_S(t) = 1 - [1 - E(Y_A)] [1 - E(Y_B)E(Y_C)] [1 - E(Y_D)] [1 - E(Y_E)E(Y_F)] [1 - E(Y_G)] \quad (2.27)$$

2.5.4.2.4 Cálculo da indisponibilidade do sistema através dos cortes mínimos

Outro método para cálculo de indisponibilidade é através dos cortes mínimos.

Considere-se um sistema cuja árvore de falhas tenha "m" cortes mínimos, a saber:

$$\begin{array}{ll} \{B_{1,1}, B_{2,1}, \dots, B_{n1,1}\} & \text{corte 1} \\ \vdots & \vdots \\ \{B_{1,j}, B_{2,j}, \dots, B_{nj,j}\} & \text{corte j} \\ \vdots & \vdots \\ \{B_{1,m}, B_{2,m}, \dots, B_{nm,m}\} & \text{corte m} \end{array}$$

Seja $Y_{i,j}$ a variável binária do evento $B_{i,j}$.

A Figura 2.4 representa a árvore de falhas dos cortes mínimos. Esta árvore é equivalente àquela construída inicialmente para o sistema, da qual foram obtidos os cortes.

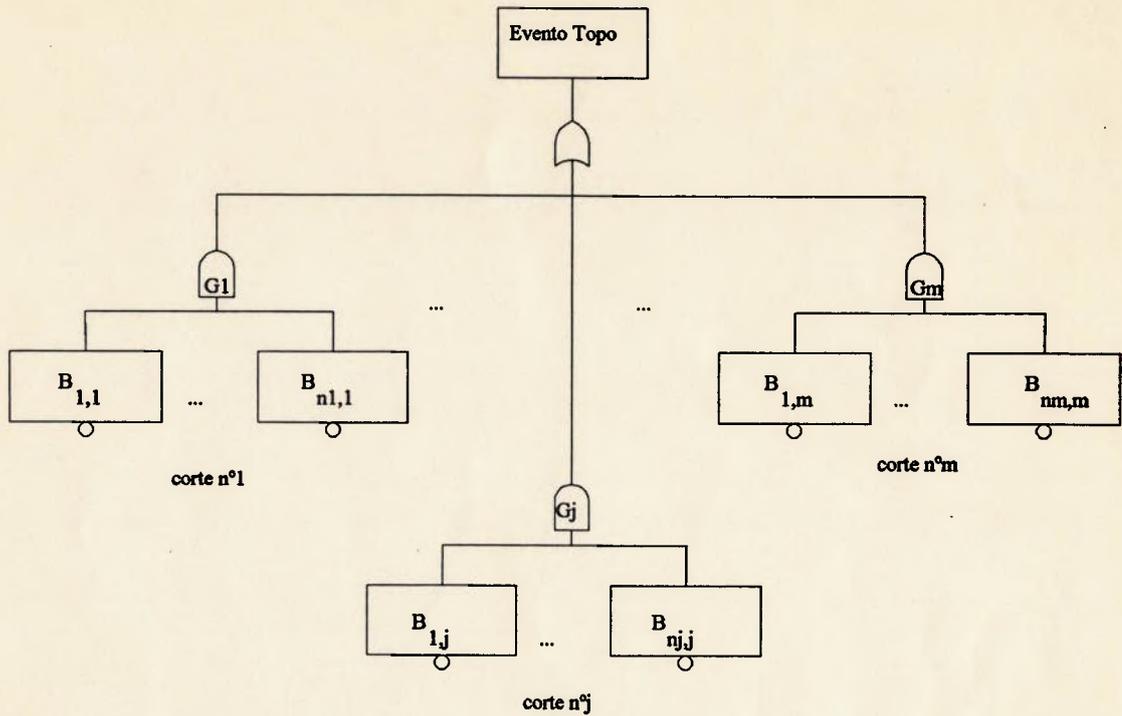


Figura 2.4 Árvore de falhas dos cortes mínimos

A função de estrutura para a árvore da Figura 2.4 é dada por:

$$\Psi(Y) = \bigvee_{j=1}^m \left[\bigwedge_{i=1}^{n_j} y_{i,j} \right] \quad (2.28)$$

Sua forma algébrica é dada por:

$$\Psi(Y) = 1 - \prod_{j=1}^m \left[1 - \prod_{i=1}^{n_j} y_{i,j} \right] \quad (2.29)$$

Chamando de $k_j(y)$ a função de estrutura para o portão "E" G_j da Figura 2.4, tem-se:

$$k_j(y) = \prod_{i=1}^{n_j} y_{i,j} \quad (2.30)$$

A função $k_j(y)$ é chamada de estrutura do corte mínimo j .

A função de estrutura da árvore, $\Psi(Y)$, pode ser expressa por:

$$\Psi(Y) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - k_j(y)] \quad (2.31)$$

Esta equação é importante pois exprime a função de estrutura da árvore de falhas em função das estruturas dos cortes mínimos $k_j(y)$. A função de estrutura $\Psi(Y)$ pode ser expandida e simplificada pela lei da absorção, resultando em um polinômio similar ao obtido para as funções de estrutura do item 2.5.4.2.2. A indisponibilidade do sistema, $Q_S(t)$, pode ser calculada da mesma maneira apresentada no item 2.5.4.2.3, ou seja:

$$Q_S(t) = \Pr(\text{evento topo}) = \Pr(\Psi(Y)=1) = E(\Psi(Y)) \quad (2.32)$$

O exemplo a seguir ilustra o cálculo da indisponibilidade do sistema através dos cortes mínimos.

A Figura 2.5 mostra uma árvore de falhas para um sistema votador (*voting system*) 2 de 3.

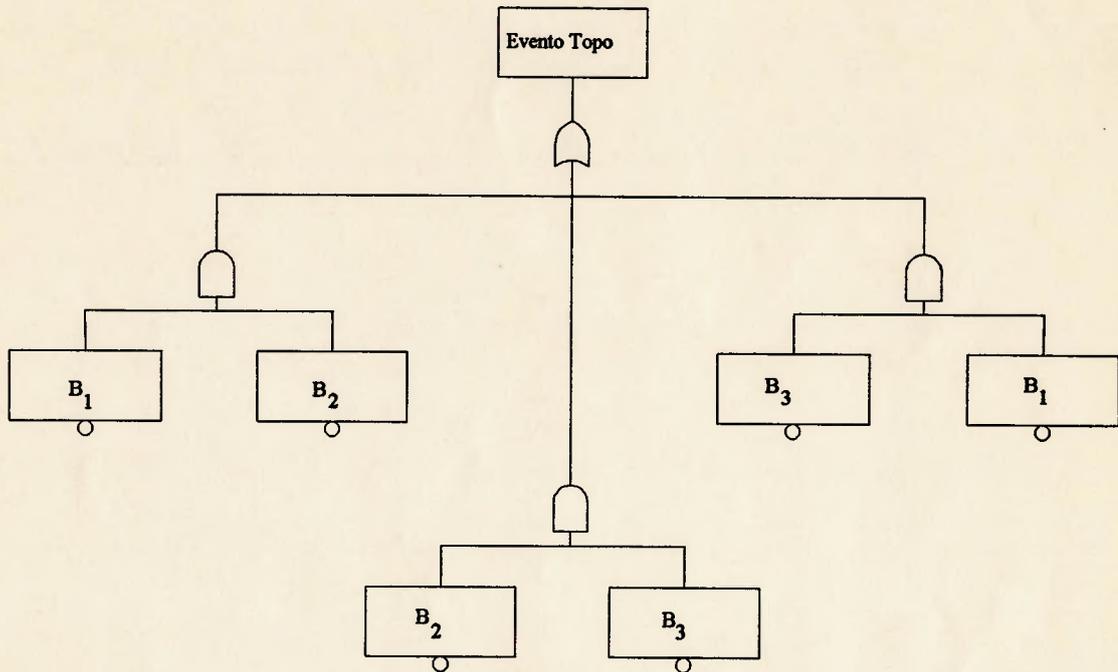


Figura 2.5 Árvore de falhas para um sistema votador 2 de 3

O sistema votador possui três cortes mínimos:

- a) $\{B_1, B_2\}$;
- b) $\{B_2, B_3\}$; e
- c) $\{B_3, B_1\}$.

As estruturas dos cortes mínimos serão:

$$a) k_1(y) = y_1 y_2 \quad (2.33)$$

$$b) k_2(y) = y_2 y_3 \quad (2.34)$$

$$c) k_3(y) = y_3 y_1 \quad (2.35)$$

Assim, a função de estrutura, $\Psi(Y)$, a partir das estruturas dos cortes mínimos, será:

$$\Psi(Y) = 1 - \prod_{j=1}^3 [1 - k_j(y)] \quad (2.36)$$

Desenvolvendo, tem-se:

$$\Psi(Y) = 1 - [1 - k_1(y)] [1 - k_2(y)] [1 - k_3(y)] \quad (2.37)$$

$$\Psi(Y) = 1 - [1 - y_1 y_2] [1 - y_2 y_3] [1 - y_3 y_1] \quad (2.38)$$

que conduz a:

$$\Psi(Y) = y_1 y_2 + y_2 y_3 + y_3 y_1 - 2 y_1 y_2 y_3 \quad (2.39)$$

A indisponibilidade do sistema, $Q_S(t)$, será:

$$Q_S(t) = E(\Psi(Y)) \quad (2.40)$$

$$Q_S(t) = E(y_1 y_2 + y_2 y_3 + y_3 y_1 - 2 y_1 y_2 y_3) \quad (2.41)$$

$$Q_S(t) = E(y_1 y_2) + E(y_2 y_3) + E(y_3 y_1) - 2E(y_1 y_2 y_3) \quad (2.42)$$

Como os eventos são independentes, tem-se:

$$Q_S(t) = E(y_1)E(y_2) + E(y_2)E(y_3) + E(y_3)E(y_1) - 2E(y_1)E(y_2)E(y_3) \quad (2.43)$$

Tendo-se a média das variáveis envolvidas, obtém-se o valor numérico para a indisponibilidade do sistema.

2.6 Distribuição utilizada na estimativa de confiabilidade

Sabe-se que muitos equipamentos/componentes têm uma vida que pode ser representada por uma distribuição exponencial, como por exemplo, os componentes eletrônicos. Esta distribuição apresenta muitas vantagens por ter tratamento matemático simples e bastante desenvolvido. Assim, há uma tendência a utilizá-la para qualquer tipo de equipamento. Deve-se ressaltar, porém, que esta hipótese só é válida para componentes com taxas de falha constantes ao longo do tempo.

A curva da taxa instantânea de falhas em função do tempo, conhecida como "Curva da Banheira", está ilustrada na Figura 2.6. A hipótese de taxa de falha constante só é válida para a região II, onde ocorrem as falhas aleatórias. Isto é razoável, pois a análise de confiabilidade de sistemas com este tipo de equipamento leva em consideração esta fase da vida dos mesmos e não a fase de "burn in" ou de falhas precoces (região I), nem a fase de falhas por desgaste ou de final de vida útil (região III).

Já, os equipamentos mecânicos têm sua vida melhor representada pela distribuição de Weibull (VANNOY, 1990).

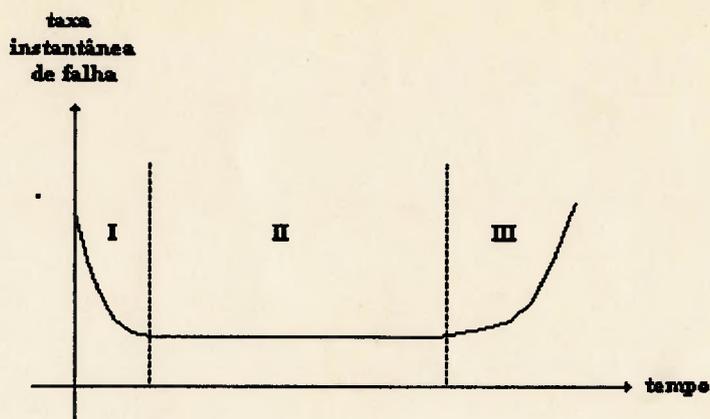


Figura 2.6 Curva da taxa instantânea de falhas em função do tempo - "Curva da Banheira"

A curva da taxa instantânea de falhas em função do tempo para equipamentos mecânicos está ilustrada na Figura 2.7.

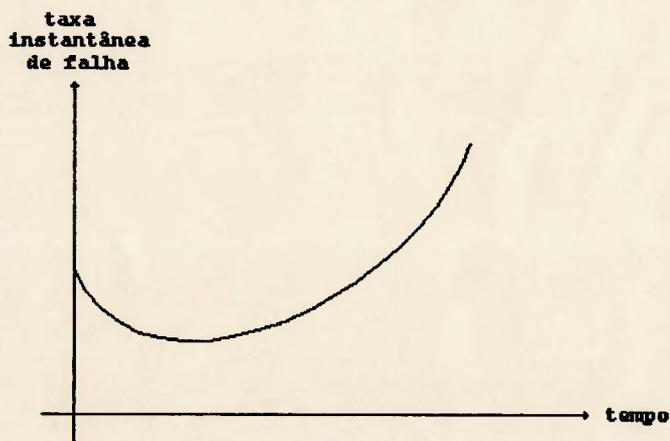


Figura 2.7 Curva da taxa instantânea de falhas em função do tempo para componentes mecânicos

A distribuição de Weibull permite a análise de sistemas com componentes que possuem taxas de falha variando ao longo do tempo. As equações para a confiabilidade ($R(t)$), para a taxa de falhas ($\lambda(t)$) e para a vida média (VM) para esta distribuição são dadas por:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\sigma}\right)^\beta} \quad (2.44)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta \cdot t^{\beta-1}}{\sigma^\beta} \quad (2.45)$$

$$VM = \sigma \cdot \Gamma\left(\frac{1+\beta}{\beta}\right) \quad (2.46)$$

onde:

σ é o parâmetro de escala da distribuição de Weibull;
 β é o parâmetro de forma da distribuição de Weibull; e

$\Gamma\left(\frac{1+\beta}{\beta}\right)$ é o valor da função gama no ponto $\frac{1+\beta}{\beta}$.

Cabe ressaltar que a distribuição exponencial é um caso particular da Weibull, onde $\beta=1$.

2.7 Tratamento estatístico de dados

Quando dispõe-se de dados de falha de equipamentos, obtidos através do registro adequado de suas falhas, reparos, tempos, etc., pode-se fazer o tratamento estatístico de tais dados. Este tratamento tem a finalidade de verificar se as hipóteses adotadas durante a análise de confiabilidade são corretas. Isto implica na verificação dos modelos de distribuições de probabilidade utilizados para as taxas de falha.

2.7.1 Levantamento de dados

Para cada equipamento que entra na análise de confiabilidade, procura-se fazer um levantamento de dados de falha que permita verificar a adequação das hipóteses feitas durante a análise. É através da aplicação de testes de aderência que aceita-se ou rejeita-se as hipóteses admitidas. Durante o levantamento de dados, é importante analisar, também, se a falha em um determinado componente não implica na falha concomitante de outros, constatando se há ou não falhas com causa comum para o sistema.

O levantamento de dados deve ser feito através do preenchimento de um formulário conforme mostra a Figura 2.8, e se aplica a qualquer tipo de componente, quer seja mecânico, elétrico, etc., presente em embarcações, navios ou submarinos. As informações necessárias para preenchimento estão detalhadas no Apêndice.

2.7.2 Teste de aderência de dados às distribuições

Testes de aderência são testes em que faz-se a hipótese que a variável de interesse na população seja descrita por um determinado modelo de distribuição de probabilidade e verifica-se a boa ou má aderência dos dados da amostra ao modelo.

RELATÓRIO PARA OBTENÇÃO DE TAXAS DE FALHAS			
1 IDENTIFICAÇÃO			
<div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 15px; margin: 0 auto;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 15px; margin: 0 auto;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 40px; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	
DIA MÊS ANO	NÚM. RELATÓRIO	NOME DO RESPONSÁVEL	
<div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 15px; margin: 0 auto;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>		<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>
NAVIO	NOME DO NAVIO		NOME DO EQUIPAMENTO E SISTEMA
<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>		<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	
NÚMERO DE SÉRIE DO EQUIPAMENTO		NOME DO EQUIPAMENTO E SISTEMA	
2 ESTADO DO EQUIPAMENTO			
<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>
PARTIDA	DESLIGAMENTO PARA MANUTENÇÃO PREVENTIVA	AVARIA	DESLIGAMENTO NORMAL DURANTE A MISSÃO
DATA HOR-MIN HOR-IM.	DATA HOR-MIN HOR-IM.	DATA HOR-MIN HOR-IM.	DATA HOR-MIN HOR-IM.
<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>
<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>
<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>
<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 15px; margin: 0 auto;"></div>
3 AÇÃO DE MANUTENÇÃO REQUERIDA			
<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 40px; margin: 0 auto;"></div>			
4 IDENTIFICAÇÃO DA AVARIA			
4A TIPO DE AVARIA E EQUIPAMENTO AFETADO			
<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 40px; margin: 0 auto;"></div>			
4B ESTADO DO EQUIPAMENTO NA DETECÇÃO DA AVARIA			
<input type="checkbox"/> DURANTE OPERAÇÃO NORMAL	<input type="checkbox"/> DURANTE MANUTENÇÃO PREVENTIVA	<input type="checkbox"/> AO LIGAR O EQUIPAMENTO	<input type="checkbox"/> DURANTE MUDANÇAS NO MODO DE OPERAÇÃO
<input type="checkbox"/> DURANTE INSPEÇÃO	<input type="checkbox"/> DURANTE TESTE	<input type="checkbox"/> DURANTE PREPARAÇÃO PARA SUSPENDER	<input type="checkbox"/> OUTROS (EXPLICAR NO CAMPO 5)

Figura 2.8 Relatório para obtenção de taxas de falhas

4C EFEITO DA AVARIA NO EQUIPAMENTO

INOPERANTE OPERANDO INTERMITENTEMENTE
 OPERANDO COM RESTRIÇÕES OPERANDO NORMALMENTE

4D SINTOMAS DE ALTERAÇÃO NA OPERAÇÃO

SUPERAQUECIDO CENTELHAMENTO EXCESSIVO NÃO MANTÉM FREQUÊNCIA CORRETA
 NÃO OPERA LEITURA ANORMAL NÃO MANTÉM ROTAÇÃO CORRETA
 NÃO ALINHA INCORREÇÃO NO VÍDEO NÃO MANTÉM VELOCIDADE CORRETA
 DESALINHADO NÃO AJUSTA INCORREÇÃO NA VARREDURA
 NÃO SINTONIZA VIBRAÇÃO EXCESSIVA INCORREÇÃO NA INDICAÇÃO GRÁFICA
 VAZAMENTO RUÍDO EXCESSIVO SINAL VISUAL DE INCÊNDIO
 SUÇÃO INCORRETA OSCILAÇÃO IMPREVISTA INDICAÇÃO VISUAL ANORMAL
 VAZÃO INCORRETA VÁCUO INCORRETO INDICAÇÃO SONORA ANORMAL
 OUTROS (EXPLICAR NO CAMPO 5)

4E CAUSAS DA AVARIA

ELEMENTOS CAUSADORES	ESTADOS	CAUSAS
<input style="width: 100%; height: 100%;" type="text"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input style="width: 100%; height: 100%;" type="text"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input style="width: 100%; height: 100%;" type="text"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

ESTADOS	ESTADOS	CAUSAS
[01] CORROÍDO	[11] FOLGA EXCESSIVA	[01] DEFEITO DE FABRICAÇÃO
[02] ENTUPIDO	[12] TREPIDAÇÃO	[02] FALHA NA INSTALAÇÃO
[03] DETERIORADO	[13] DESGASTE EXCESSIVO	[03] MEIO AMBIENTE ANORMAL
[04] FURADO	[14] CURTO-CIRCUITO	[04] PROCEDIMENTO INADEQUADO DE OPERAÇÃO
[05] QUEBRADO	[15] CIRCUITO ABERTO	[05] MANUTENÇÃO INADEQUADA OU INEXISTENTE
[06] RACHADO	[16] NÍVEL LÓGICO ANORMAL	[06] NÃO CUMPRIMENTO DA ROTINA DE MANUTENÇÃO
[07] EMPENADO	[17] NÃO ACEITA AJUSTE	[07] AGENTE CONTAMINADO
[08] QUEIMADO	[18] COMPONENTE COM VALOR ALTERADO	[08] EXPLOÇÃO
[09] CONGELADO	[19] DEFEITO DESCONHECIDO	[09] MANUSEIO INADEQUADO
[10] SUPERAQUECIDO	[20] ELEMENTO FORA DA ESPECIFICAÇÃO	[10] MAU CONTATO
	[99] OUTROS (EXPLICAR NO CAMPO 5)	[11] DESGASTE ANORMAL
		[12] ALIMENTAÇÃO INADEQUADA
		[13] OSCILAÇÃO NA LINHA
		[14] CAUSA DESCONHECIDA
		[15] OUTROS (EXPLICAR NO CAMPO 5)

Figura 2.8 Relatório para obtenção de taxas de falhas (continuação)

4f TEMPO EFETIVO DE REPARO									
INÍCIO/REINÍCIO DO REPARO				INTERRUPÇÃO/FIM DO REPARO				TEMPO TOTAL	
DIA	MÊS	HORA	MIN	DIA	MÊS	HORA	MIN	HORAS	MIN

5 OBSERVAÇÕES NECESSÁRIAS

Figura 2.8 Relatório para obtenção de taxas de falhas
(continuação)

Se for obtida uma boa aderência e a amostra for razoavelmente grande, pode-se, em princípio, admitir que o modelo fornece uma boa idealização da distribuição populacional. Chamando de H_0 a hipótese a ser testada, deve-se adotar um nível de significância do teste (α), de forma que, ao rejeitar H_0 sendo H_0 verdadeira, será cometido um erro com probabilidade α .

2.7.2.1 Procedimento a ser utilizado para teste de dados

O teste de aderência a ser considerado utiliza o método do qui-quadrado e baseia-se na estatística dada por:

$$\chi_v^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (2.47)$$

onde:

χ_v^2 é a estatística de teste com v graus de liberdade;

O_i é a frequência observada de uma determinada classe ou valor da variável;

E_i é a frequência esperada, segundo o modelo testado, dessa classe ou valor; e

k é o número de classes ou valores considerados.

Este método mostra que, tendo todas as classes $E_i \geq 5$ (ALLEN, 1978), se o modelo testado for verdadeiro, o valor da somatória apresentada acima terá aproximadamente uma

distribuição qui-quadrado com $v=k-n-1$ graus de liberdade, onde n é o número de parâmetros do modelo estimados independentemente a partir da amostra. A exigência de se ter sempre $E_i \geq 5$ foi obtida da experiência prática, que mostrou ser esta uma condição necessária para aplicação do teste.

Uma vez levantados os dados para cada equipamento, aplica-se o procedimento descrito a seguir.

- a) Adotar como hipótese H_0 a ser testada o seguinte: a vida do equipamento segue uma determinada distribuição.
- b) Agrupar as falhas em categorias (i) que levem em consideração o tempo para a ocorrência de falhas, ou seja, o tempo que o equipamento leva para falhar.
- c) Associar a cada categoria a frequência observada do tempo para ocorrência de falhas (O_i).
- d) Calcular os parâmetros da distribuição escolhida a partir da amostra.
- e) Calcular o valor da função de distribuição acumulada de falhas do sistema $F(t)$ para o instante extremo superior " t_{sup} " de cada categoria, que será o mesmo valor da função no instante extremo inferior " t_{inf} " da categoria seguinte, através de:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (2.48)$$

onde $R(t)$ é a confiabilidade do sistema para a distribuição escolhida. Por exemplo, para a distribuição exponencial, tem-se:

$$R(t) = e^{-\bar{\lambda}t} \quad (2.49)$$

onde:

λ é a taxa de falhas, constante, para esta distribuição.

Para a distribuição de Weibull, tem-se:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\sigma}\right)^{\beta}} \quad (2.50)$$

f) Calcular o valor esperado (E_i) para a frequência de tempo para ocorrência de falhas para cada categoria, pela expressão:

$$E_i = [F(t_{sup}) - F(t_{inf})] \times N \quad (2.51)$$

onde:

N é o número total de observações;

$F(t_{sup})$ é o valor calculado no item anterior para o instante superior da categoria; e

$F(t_{inf})$ é o valor calculado no item anterior para o instante inferior da categoria.

g) Observar se todas as categorias apresentam $E_i \geq 5$. Caso existam categorias em que $E_i < 5$, agrupá-las às categorias adjacentes até que todas satisfaçam a condição necessária.

h) Calcular, para cada categoria, o seguinte valor:

$$\frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

i) Calcular o número de graus de liberdade (v) da estatística de χ^2 .

j) obter o valor da estatística de χ_v^2 , através de:

$$\chi_v^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (2.52)$$

k) Adotar um nível de significância (α) desejado para o teste, onde:

$$\text{probabilidade } (\chi_v^2 > \chi_{v,\alpha}^2) = \alpha \quad (2.53)$$

l) Obter o valor de $\chi_{crítico}^2$ da tabela estatística das distribuições de χ^2 reproduzida na Tabela 2.6, onde:

$$\chi_{\text{crítico}}^2 = \chi_{v,\alpha}^2 \quad (2.54)$$

m) Comparar o valor de χ_v^2 com $\chi_{\text{crítico}}^2$.

Se:

$$\chi_v^2 \leq \chi_{\text{crítico}}^2 \quad (2.55)$$

A hipótese H_0 será aceita, ou seja, a vida do equipamento segue a distribuição escolhida.

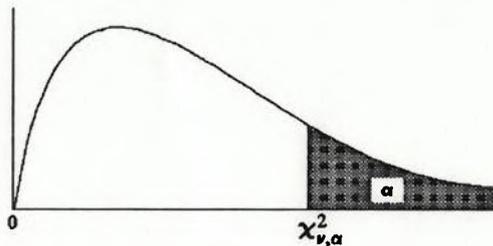
Se:

$$\chi_v^2 > \chi_{\text{crítico}}^2 \quad (2.56)$$

A hipótese H_0 será rejeitada, ou seja, a vida do equipamento não segue a distribuição escolhida.

Isto é razoável, pois, se o modelo testado estiver longe da realidade, as frequências observadas irão diferir bastante das esperadas e a variável de teste tenderá a crescer.

Concluindo, sendo a hipótese H_0 tida como verdadeira, fica validada a utilização da distribuição escolhida para a vida dos equipamentos no modelo de confiabilidade adotado.

Tabela 2.6 Tabela das distribuições de χ^2 

v	α							
	0,995	0,990	0,975	0,950	0,05	0,025	0,010	0,005
1	0,0000393	0,000157	0,000982	0,00393	3,8415	5,0239	6,6349	7,8794
2	0,0100	0,0201	0,0506	0,1026	5,9915	7,3778	9,2103	10,597
3	0,0717	0,1148	0,2158	0,3518	7,8147	9,3484	11,345	12,838
4	0,2070	0,2971	0,4844	0,7107	9,4877	11,143	13,277	14,860
5	0,4117	0,5543	0,8312	1,1455	11,071	12,833	15,086	16,750
6	0,6757	0,8721	1,2373	1,6354	12,592	14,449	16,812	18,548
7	0,9893	1,2390	1,6899	2,1674	14,067	16,013	18,475	20,278
8	1,3444	1,6465	2,1797	2,7326	15,507	17,535	20,090	21,955
9	1,7350	2,0879	2,7004	3,3251	16,920	19,023	21,666	23,589
10	2,1559	2,5582	3,2470	3,9403	18,307	20,483	23,209	25,188
11	2,6032	3,0535	3,8158	4,5748	19,675	21,920	24,725	26,757
12	3,0738	3,5706	4,4038	5,2260	21,026	23,337	26,217	28,300
13	3,5650	4,1069	5,0087	5,8919	22,362	24,736	27,688	29,819
14	4,0747	4,6604	5,6287	6,5706	23,685	26,119	29,141	31,319
15	4,6009	5,2294	6,2621	7,2609	24,996	27,488	30,578	32,801
16	5,1422	5,8122	6,9077	7,9616	26,296	28,845	32,000	34,267
17	5,6972	6,4078	7,5642	8,6718	27,587	30,191	33,409	35,719
18	6,2648	7,0149	8,2308	9,3905	28,869	31,526	34,805	37,156
19	6,8440	7,6327	8,9066	10,117	30,144	32,852	36,191	38,582
20	7,4339	8,2604	9,5908	10,851	31,410	34,170	37,566	39,997
21	8,0337	8,8972	10,283	11,591	32,671	35,479	38,932	41,401
22	8,6427	9,5425	10,982	12,338	33,924	36,781	40,289	42,796
23	9,2604	10,196	11,689	13,091	35,173	38,076	41,638	44,181
24	9,8862	10,856	12,401	13,848	36,415	39,364	42,980	45,559
25	10,520	11,524	13,120	14,611	37,653	40,647	44,314	46,928
26	11,160	12,198	13,844	15,379	38,885	41,923	45,642	48,290
27	11,808	12,879	14,573	16,151	40,113	43,194	46,963	49,645
28	12,461	13,565	15,308	16,928	41,337	44,461	48,278	50,993
29	13,121	14,257	16,047	17,708	42,557	45,722	49,588	52,336
30	13,787	14,954	16,791	18,493	43,773	46,980	50,892	53,672
40	20,707	22,164	24,433	26,509	55,759	59,342	63,691	66,766
50	27,991	29,707	32,357	34,764	67,505	71,420	76,154	79,490
60	35,535	37,485	40,482	43,188	79,082	83,298	88,380	91,952
70	43,275	45,442	48,758	51,739	90,531	95,023	100,425	104,215
80	51,172	53,540	57,153	60,392	101,879	106,629	112,329	116,321
90	59,196	61,754	65,647	69,126	113,145	118,136	124,116	128,299
100	67,328	70,065	74,222	77,930	124,342	129,561	135,807	140,169
z_α	-2,5758	-2,3263	-1,9600	-1,6449	+1,6449	+1,9600	+2,3263	+2,5758

Para $v > 100$, usar:

$$\chi^2_{v,\alpha} = v \left\{ 1 - \frac{2}{9v} + z_\alpha \sqrt{\frac{2}{9v}} \right\}^3$$
, aonde z_α encontra-se na última linha da tabela acima.

3 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE LINHA DE EIXO DE UM SUBMARINO

3.1 Considerações gerais

O sucesso no emprego de submarinos está diretamente relacionado à capacidade da sua planta propulsora. Até o final do século 19, quando houve o desenvolvimento dos motores de combustão interna, a utilização de submarinos era bastante limitada. Com o desenvolvimento de tais motores e de baterias, o projeto da propulsão de submarinos ganhou impulso no mundo. A propulsão convencional diesel-elétrica foi utilizada como fonte de potência em todos os submarinos construídos desde o início da Primeira Guerra Mundial até a década de 50, quando houve a transição para a propulsão nuclear. Em 1950, iniciou-se o projeto do primeiro submarino nuclear, o Nautilus, lançado em 1954 nos Estados Unidos.

Este capítulo apresenta a análise de confiabilidade do sistema de linha de eixo de um submarino com propulsão nuclear.

O tipo de reator mais freqüentemente utilizado para propulsão de embarcações é o reator a água pressurizada, conhecido como tipo *PWR* (*Pressurized Water Reactor*).

O ciclo térmico empregado neste tipo de instalação é composto basicamente de dois sistemas principais: o circuito primário e o ciclo secundário.

O circuito primário é o responsável pela geração de energia para a planta de propulsão. Isto se dá através da produção de calor pela fissão dos átomos de urânio 235 dentro do reator. O fluido do circuito primário é conduzido ao trocador de calor denominado gerador de vapor, onde ocorre a transferência de calor para o fluido do ciclo secundário.

Este, por sua vez, tem a finalidade de transformar a energia térmica em energia mecânica através da expansão do vapor proveniente do gerador de vapor nas turbinas do ciclo.

Os turbo-geradores produzem potência elétrica para os consumidores de bordo e as turbinas de propulsão acionam o eixo propulsor através de engrenagens redutoras.

O sistema a ser analisado engloba os componentes a partir do conjunto de engrenagens redutoras e está detalhado na seção seguinte.

3.2 Descrição do sistema de linha de eixo

O sistema de linha de eixo a ser analisado é apresentado na Figura 3.1. Esta instalação é característica de um

submarino com propulsão nuclear. Os componentes indicados na figura são:

E: Eixo Propulsor

S: Selo

H: Hélice

AR: Acoplamento Rígido

ME: Mancal de Escora

AF: Acoplamento Flexível

CR: Caixa Redutora

TP-BB: Turbina de Propulsão de Bombordo

TP-BE: Turbina de Propulsão de Boreste

TT: Tubo Telescópico

MV: Mancal de Vante do Tubo Telescópico

MR: Mancal de Ré do Tubo Telescópico

O sistema de linha de eixo tem as seguintes funções:

a) transmitir o torque gerado pelas turbinas ao hélice da embarcação; e

b) transmitir o empuxo produzido pelo hélice para o casco do navio, possibilitando o avanço deste na água.

Os diversos componentes do sistema estão arrançados de modo que a linha de eixo cumpra corretamente as suas funções.

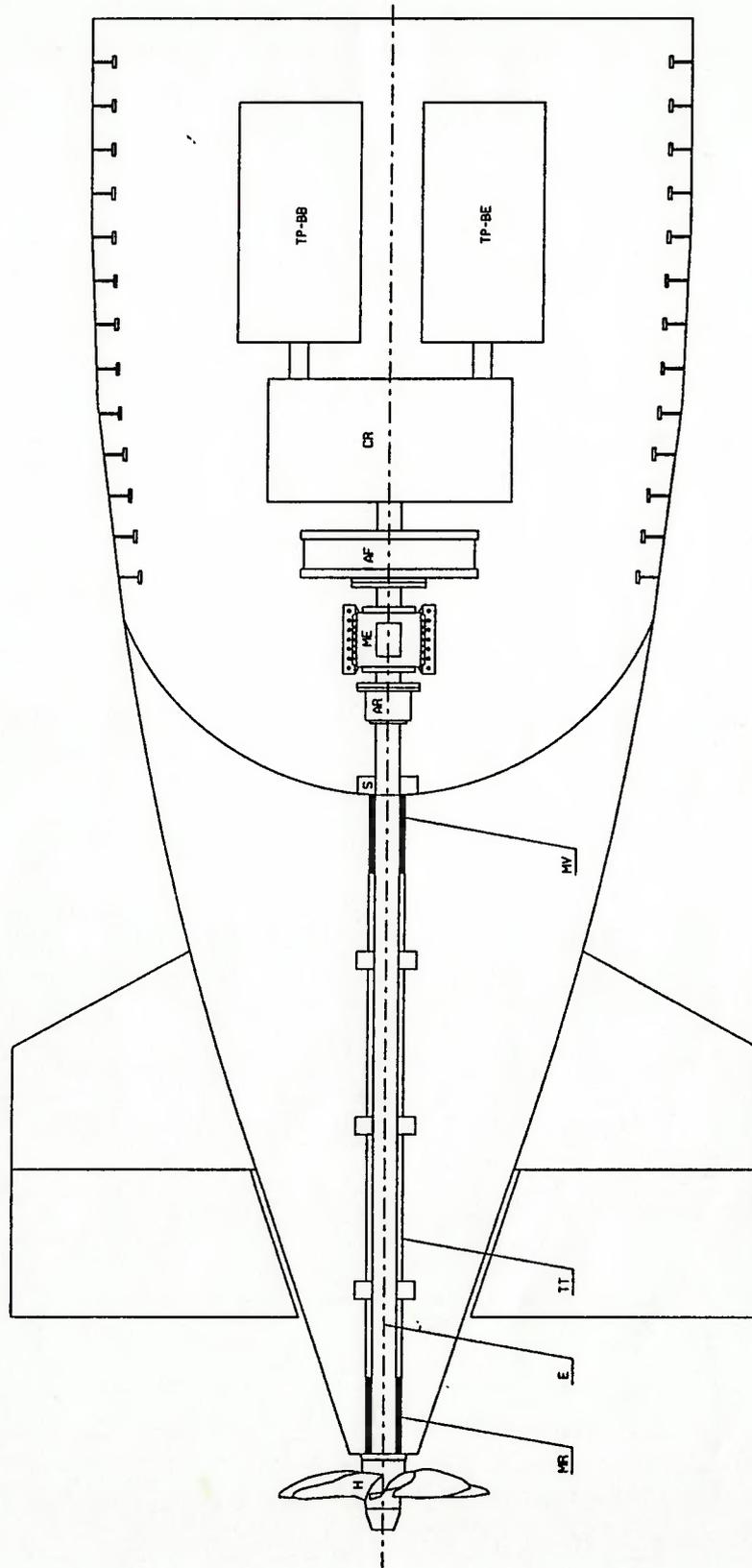


Figura 3.1 Esquema básico do sistema de linha de eixo de um submarino típico

A máquina principal são duas turbinas a vapor que acionam a linha de eixo. A rotação requerida pelo eixo da embarcação é bastante inferior à rotação dos eixos das turbinas. Assim, é necessário que se instale uma caixa redutora, composta de uma série de engrenagens, obtendo-se na saída, a rotação do eixo propulsor.

Após a caixa redutora, tem-se um acoplamento flexível cuja finalidade é compensar os deslocamentos relativos que possam ocorrer entre a linha de eixo e a caixa. Este acoplamento é composto de elementos elastômeros possuindo, também, esbarros metálicos para assegurar a transmissão do torque em caso de rompimento dos elastômeros.

A seguir, tem-se o mancal de escora que deve transmitir o empuxo produzido pelo hélice para a estrutura do navio. O mancal é do tipo axial-radial, auto-lubrificado e resfriado por água do mar.

O eixo de escora liga-se ao eixo propulsor através de um acoplamento rígido, porém removível, para permitir a retirada do eixo pelo tubo telescópico.

O tubo telescópico é composto de várias seções flangeadas entre si, sendo uma provida de trecho flexível com a finalidade de acomodar variações dimensionais da estrutura de ré do submarino. A extremidade do tubo telescópico é soldada à estrutura do casco resistente, e o restante

atravessa o casco hidrodinâmico até a extremidade anterior ao propulsor.

O selo do tubo telescópico tem a função de impedir a entrada de água do mar para dentro da embarcação. É resfriado por água do mar, sendo composto de uma parte girante, fixada ao eixo propulsor através de chaveta, uma parte fixa, parafusada ao casco resistente, e uma parte em balanço situada entre as duas anteriores. Possui uma caixa de gaxetas, feitas de fibra impregnadas com grafite ou teflon, que faz a vedação do eixo quando há uma pequena passagem de água. Possui, ainda, um selo inflável como última segurança contra alagamentos, que exige a parada do eixo para que a vedação seja garantida.

O eixo propulsor propriamente dito sai do acoplamento rígido com o eixo de escora, atravessa todo o tubo telescópico e termina na extremidade que suporta o hélice. É normalmente vazado para diminuir seu peso total. Possui revestimento no trecho onde fica em contato com a água salgada, que vai do selo à extremidade de ré, para impedir a corrosão pela água do mar que circula no tubo. É apoiado por dois mancais instalados à vante e à ré do tubo telescópico. O revestimento na região dos mancais e do selo é feito por camisas de bronze. Entre os mancais, o revestimento é feito com resina.

Os mancais são compostos por uma bucha de bronze revestida internamente com borracha e lubrificados a água salgada.

Na extremidade do eixo tem-se o propulsor que é de passo fixo feito em liga de bronze com manganês e alumínio.

A identificação mais detalhada dos componentes da linha de eixo é feita na seção seguinte, no desenvolvimento da análise de modos de falha e efeitos.

3.3 Análise de modos de falha e efeitos

Para a identificação dos modos de falha, bem como suas causas e efeitos, foram consultados profissionais da área técnica de projeto de linhas de eixo. Foram obtidas, também, informações da prática de profissionais com experiência na operação e manutenção de sistemas de propulsão de submarinos.

Existem fatores que afetam todos os componentes da linha de eixo, causando a aceleração do processo de falha dos mesmos. Tais fatores não constam na análise de modos de falha e efeitos, pois são considerados como agravantes dos modos de falha e não como causas comuns a estes. Exemplo típico é a vibração inerente à operação da linha.

As tabelas 3.1 a 3.10 contêm a análise de modos de falha e efeitos do sistema de linha de eixo por componente.

Tabela 3.1- Análise de modos de falha e efeitos da caixa redutora

IDENTIFICAÇÃO DO COMPONENTE	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA	EFEITOS NO LOCAL	EFEITOS NO SISTEMA	MÉTODO DE DETECÇÃO	RECURSOS PARA COMPENSAÇÃO
caixa redutora	conjunto de engrenagens	permitir a redução da rotação de saída do eixo da turbina para a rotação de operação do propulsor	desgaste e quebra dos dentes das engrenagens	expansão desigual entre os mancais de suporte das engrenagens de alta e de baixa rotação; dimensionamento incorreto	perda da caixa redutora	perda da propulsão	aumento do nível de ruído e vibração	não há

Tabela 3.2- Análise de modos de falha e efeitos do acoplamento flexível

IDENTIFICAÇÃO DO COMPONENTE	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA	EFEITOS NO LOCAL	EFEITOS NO SISTEMA	MÉTODO DE DETECÇÃO	RECURSOS PARA COMPENSAÇÃO
acoplamento flexível	acoplamento flexível composto de elementos elastômeros com esbarros metálicos	compensar os deslocamentos relativos entre a caixa redutora e a linha de eixo	rompimento dos elastômeros	contato contínuo com óleo ou graxa que atacam o elemento elástico	movimentação indesejada das partes do eixo adjacentes ao acoplamento	caso os esbarros metálicos se rompam, não haverá transmissão de torque com perda da propulsão	ruídos e vibração excessivos no acoplamento	o acoplamento possui esbarros metálicos para garantir a propulsão até ser efetuado o reparo, em caso de falha destes, faz-se o engate de pino rígido para chegar à base
			ruptura da carcaça do acoplamento	fadiga do material; defeitos de fabricação ou de montagem	perda do óleo lubrificante do rolamento e avaria do mesmo	perda da propulsão	idem ao anterior	engate de pino rígido para chegar à base para reparo

Tabela 3.3- Análise de modos de falha e efeitos do mancal de escora

IDENTIFICAÇÃO DO COMPONENTE	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA	EFEITOS NO LOCAL	EFEITOS NO SISTEMA	MÉTODO DE DETECÇÃO	RECURSOS PARA COMPENSAÇÃO
mancal de escora	mancal axial-radial, auto-lubrificado e resfriado por água do mar	transmitir o empuxo produzido pelo hélice para a estrutura do navio	<p>mancal desanda por sobrecarga nas sapatas</p>	<p>defeitos de instalação fazendo com que as sapatas fiquem incorretamente acentadas</p>	<p>danos ao colar de escora após gastar o metal patente de recobrimento</p>	<p>travamento do eixo com perda da propulsão</p>	<p>aumento do nível de vibração e ruído</p>	<p>não há</p>
			<p>movimentação do jazente do mancal em relação à fundação</p>	<p>instalação incorreta dos parafusos de fixação; rompimento da solda estrutural da fundação</p>	<p>atrito entre o jazente e a fundação</p>	<p>perda da propulsão</p>	<p>idem ao anterior</p>	<p>não há</p>
			<p>atrito seco entre as partes do mancal</p>	<p>utilização de óleo lubrificante fora de especificação</p>	<p>perda do mancal de escora</p>	<p>perda da propulsão</p>	<p>aumento da temperatura e pressão do óleo e aumento do nível de ruído</p>	<p>não há</p>
			<p>reversão brusca</p>	<p>critérios de dimensionamento deficientes</p>	<p>danos ao mancal</p>	<p>perda da propulsão</p>	<p>aumento do nível de vibração e ruído</p>	<p>não há</p>

Tabela 3.3- Análise de modos de falha e efeitos do mancal de escora (continuação)

IDENTIFICAÇÃO DO COMPONENTE	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA	EFEITOS NO LOCAL	EFEITOS NO SISTEMA	MÉTODO DE DETECÇÃO	RECURSOS PARA COMPENSAÇÃO
			trincas na carcaça	defeitos de fabricação ou de montagem; impurezas no material	vazamento do óleo lubrificante; contaminação do óleo com água do mar do resfriador causando emulsificação com derretimento do metal patente	perda da propulsão	aumento da temperatura do mancal	não há
			lubrificação inadequada	mistura de óleos lubrificantes de diferentes viscosidades	emulsificação dos óleos com comprometimento do metal patente das sapatas	caso não seja solucionado, ocorrerá a perda do mancal e consequente perda da propulsão	aumento da temperatura do mancal	pode-se utilizar aditivo de alta pressão

Tabela 3.4- Análise de modos de falha e efeitos do acoplamento rígido

IDENTIFICAÇÃO DO COMPONENTE	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA	EFEITOS NO LOCAL	EFEITOS NO SISTEMA	MÉTODO DE DETECÇÃO	RECURSOS PARA COMPENSAÇÃO
acoplamento rígido	acoplamento rígido removível, permitindo a retirada do eixo propulsor pelo tubo telescópico	fazer a união do eixo propulsor ao mancal de escora, através do eixo de escora	cisalhamento dos parafusos de acoplamento	dimensionamento incorreto dos parafusos; defeitos de fabricação ou de montagem; impurezas no material	perda do acoplamento	perda da propulsão	aumento do nível de vibração e ruído	não há
			acoplamento desanda	dimensionamento incorreto da tolerância de montagem; defeitos de montagem	perda do acoplamento	perda da propulsão	idem ao anterior	não há

Tabela 3.5- Análise de modos de falha e efeitos do selo do tubo telescópico

IDENTIFICAÇÃO DO COMPONENTE	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA	EFEITOS NO LOCAL	EFEITOS NO SISTEMA	MÉTODO DE DETEÇÃO	RECURSOS PARA COMPENSAÇÃO
selo do tubo telescópico	selo mecânico resfriado por água salgada, composto por uma parte girante fixada ao eixo, uma parte fixa parafusada ao casco e uma parte em balanço entre as duas	promover a vedação da linha de eixo com o casco resistente, impedindo a entrada de água para dentro da embarcação	desgaste do selo com destruição dos elementos mecânicos que fazem a vedação	defeito de montagem gerando má distribuição de esforços; movimentação do selo; atrito seco; corrosão eletrolítica pela diferença de materiais entre as partes	perda da estanqueidade	se a entrada de água não puder ser contida, o eixo deverá ser parado para permitir a utilização do selo inflável	aumento do nível de vibração e ruído; inspeção local	existência de uma caixa de gaxetas e de um selo inflável como medidas de segurança
			elemento girante do selo patina	defeito de montagem gerando desgaste do elemento	perda da estanqueidade por compressão ou descompressão indevida do selo	idem ao anterior	idem ao anterior	idem ao anterior
	perda do balanceamento do selo		quebra da mola interna; defeito de fabricação	idem ao anterior	idem ao anterior	idem ao anterior	idem ao anterior	

Tabela 3.5- Análise de modos de falha e efeitos do selo do tubo telescópico (continuação)

IDENTIFICAÇÃO DO COMPONENTE	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA	EFEITOS NO LOCAL	EFEITOS NO SISTEMA	MÉTODO DE DETEÇÃO	RECURSOS PARA COMPENSAÇÃO
			rompimento dos parafusos de fixação do selo	projeto deficiente; defeito de fabricação ou de montagem; impurezas no material	idem ao anterior	idem ao anterior	idem ao anterior	idem ao anterior
			perda do resfriamento	obstrução na linha de fornecimento de água salgada; perda do fornecimento de água salgada	aquecimento do selo gerando desgaste excessivo com perda da estanqueidade	idem ao anterior	idem ao anterior; aumento da temperatura do selo	idem ao anterior

Tabela 3.6- Análise de modos de falha e efeitos do eixo propulsor

IDENTIFICAÇÃO DO COMPONENTE	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA	EFEITOS NO LOCAL	EFEITOS NO SISTEMA	MÉTODO DE DETECÇÃO	RECURSOS PARA COMPENSAÇÃO
eixo propulsor	eixo vazado revestido	fazer a ligação entre o eixo de escora do mancal de escora ao propulsor, permitindo a transmissão do torque gerado pelas turbinas ao hélice e a transmissão do empuxo produzido pelo hélice ao casco da embarcação	ruptura	fadiga do material; defeitos de fabricação ou de montagem; dimensionamento deficiente; defeitos ou impurezas no material	perda do eixo	perda da propulsão	aumento do nível de vibração e ruído	não há

Tabela 3.7- Análise de modos de falha e efeitos do propulsor

IDENTIFICAÇÃO DO COMPONENTE	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA	EFEITOS NO LOCAL	EFEITOS NO SISTEMA	MÉTODO DE DETECÇÃO	RECURSOS PARA COMPENSAÇÃO
propulsor	propulsor de passo fixo feito de liga de bronze com manganês e alumínio	transformar o torque gerado pelas turbinas em empuxo a ser transmitido ao casco da embarcação	perda de pás	choque; defeitos de fabricação; defeitos no material	alteração no escoamento com diminuição do empuxo	aumento da vibração na linha; aumento da sollicitação nos mancais e possível perda da propulsão	aumento do nível de vibração e ruído	não há
			perda do propulsor	choque; defeito de montagem	perda do propulsor	perda da propulsão	idem ao anterior	não há

Tabela 3.8- Análise de modos de falha e efeitos do mancal de vante do tubo telescópico

IDENTIFICAÇÃO DO COMPONENTE	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA	EFEITOS NO LOCAL	EFEITOS NO SISTEMA	MÉTODO DE DETECÇÃO	RECURSOS PARA COMPENSAÇÃO
mancal de vante do tubo telescópico	mancal composto de bucha de bronze com revestimento de borracha, lubrificado a água salgada	suportar o peso da linha de eixo, diminuir o vão livre e manter o alinhamento	desgaste do revestimento de borracha com deformação da bucha	defeito de montagem; projeto deficiente; defeito ou impurezas no material	deformação do mancal	desalinhamento e introdução de esforços diferentes dos previstos no projeto	aumento do nível de vibração e ruído e inspeção local	não há

Tabela 3.9- Análise de modos de falha e efeitos do mancal de ré do tubo telescópico

IDENTIFICAÇÃO DO COMPONENTE	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA	EFEITOS NO LOCAL	EFEITOS NO SISTEMA	MÉTODO DE DETECÇÃO	RECURSOS PARA COMPENSAÇÃO
mancal de ré do tubo telescópico	mancal composto de bucha de bronze com revestimento de borracha, lubrificado a água salgada	suportar, principalmente, o peso do hélice, diminuir o vão livre e manter o alinhamento	desgaste do revestimento de borracha com deformação da bucha	defeito de montagem; projeto deficiente; defeito ou impurezas no material	deformação do mancal	desalinhamento e introdução de esforços diferentes dos previstos no projeto	aumento do nível de vibração e ruído e inspeção local	não há

Tabela 3.10- Análise de modos de falha e efeitos do tubo telescópico

IDENTIFICAÇÃO DO COMPONENTE	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE	FUNÇÃO DO COMPONENTE	MODO DE FALHA	CAUSA DA FALHA	EFEITOS NO LOCAL	EFEITOS NO SISTEMA	MÉTODO DE DETECÇÃO	RECURSOS PARA COMPENSAÇÃO
tubo telescópico	tubo telescópico composto de várias peças flangeadas, soldadas ao casco resistente da embarcação	garantir o fluxo de água salgada para lubrificação e resfriamento dos mancais do tubo telescópico e servir de bucha para os mesmos	ruptura do tubo	corrosão; fadiga; impurezas no material	perda do tubo telescópico	lubrificação e resfriamento deficiente dos mancais	aumento da temperatura nos mancais do tubo telescópico	não há

3.4 Análise de confiabilidade

3.4.1 Árvores de falhas

O critério de sucesso para que a linha de eixo opere satisfatoriamente, permitindo a propulsão da embarcação, exige que todos os equipamentos da linha estejam disponíveis. Entretanto, conforme informações obtidas do pessoal envolvido com a operação e manutenção de linhas de eixo de embarcações semelhantes, é improvável que ocorra a perda da propulsão por falha nos mancais do tubo telescópico. Além disso, a falha do tubo telescópico não leva à parada da linha.

Assim, com base na análise de modos de falha e efeitos desenvolvida para o sistema, pode-se construir duas árvores distintas, através da definição dos seguintes eventos topos:

- a) Operação anormal da linha de eixo: este evento engloba todas as falhas possíveis de ocorrerem ao sistema; e
- b) Perda da propulsão: este evento leva em consideração apenas as falhas que causam a parada da linha de eixo.

A Figura 3.2 mostra a árvore de falhas desenvolvida para a condição de operação anormal da linha e a Figura 3.3 mostra a árvore para a condição de perda da propulsão.

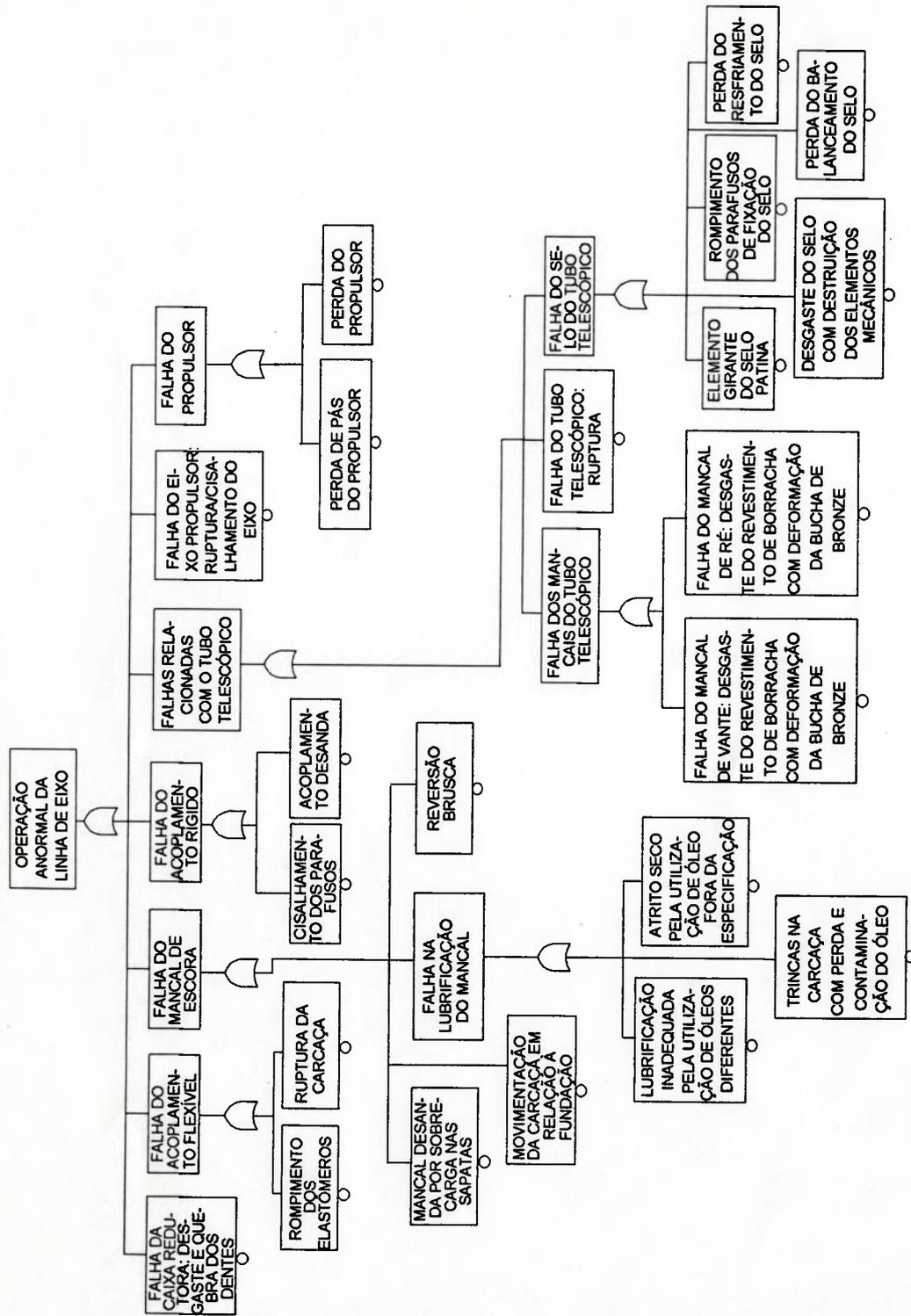


Figura 3.2 Árvore de falhas referente à operação anormal da linha de eixo

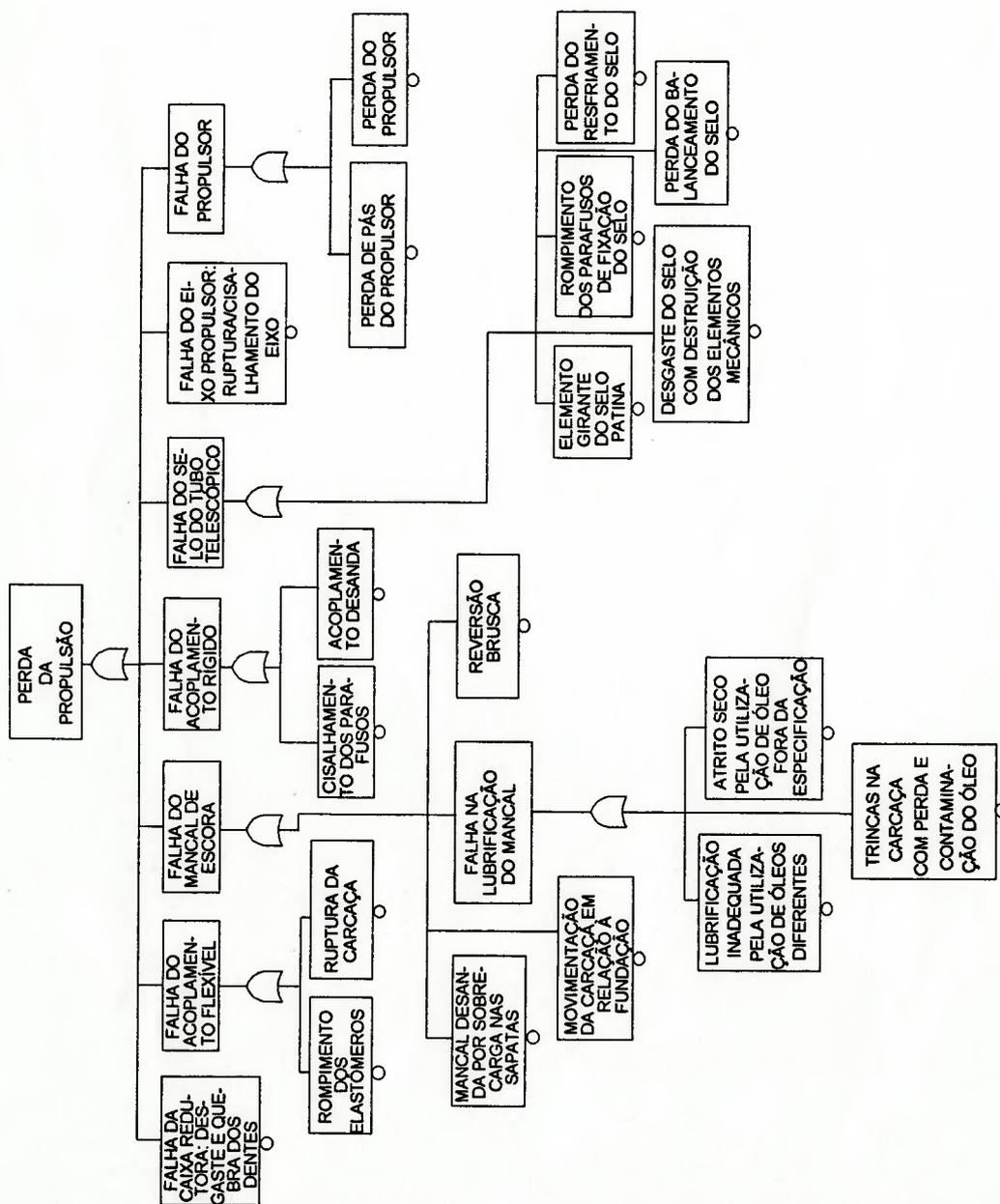


Figura 3.3 Árvore de falhas referente à perda da propulsão

O evento indesejável de interesse para a análise de confiabilidade é o evento topo da Figura 3.3, referente à perda da propulsão, uma vez que deixa a embarcação à deriva.

Embora não tenham sido constatadas falhas nos mancais do tubo telescópico que levem à perda da propulsão, é de interesse avaliar a influência destes componentes na confiabilidade do sistema. Assim, será desenvolvida uma análise em paralelo, considerando que a falha destes componentes leve à perda da propulsão. Os resultados obtidos nas duas análises serão comparados para avaliar a contribuição da falha dos mancais na disponibilidade do sistema.

As informações levantadas sobre as falhas dos componentes da linha de eixo são genéricas (RELIABILITY ANALYSIS CENTER, 1991), ou seja, não se dispõe de dados sobre a participação de cada modo para a falha do equipamento como um todo. Assim, para análise das árvores serão considerados os valores das taxas médias de falha disponíveis, ficando em um nível de resolução inferior, conforme ilustram as figuras a seguir.

A Figura 3.4 corresponde à árvore de falhas reduzida referente à perda da propulsão sem levar em consideração a falha dos mancais, denotada por caso A.

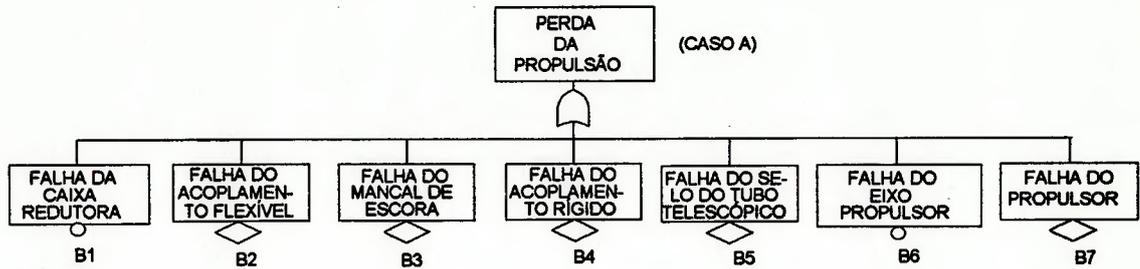


Figura 3.4 Árvore de falhas reduzida referente à perda da propulsão Caso A (excluindo os mancais do tubo telescópico)

A Figura 3.5 corresponde à árvore de falhas reduzida referente à perda da propulsão considerando a falha dos mancais, denotada por caso B.

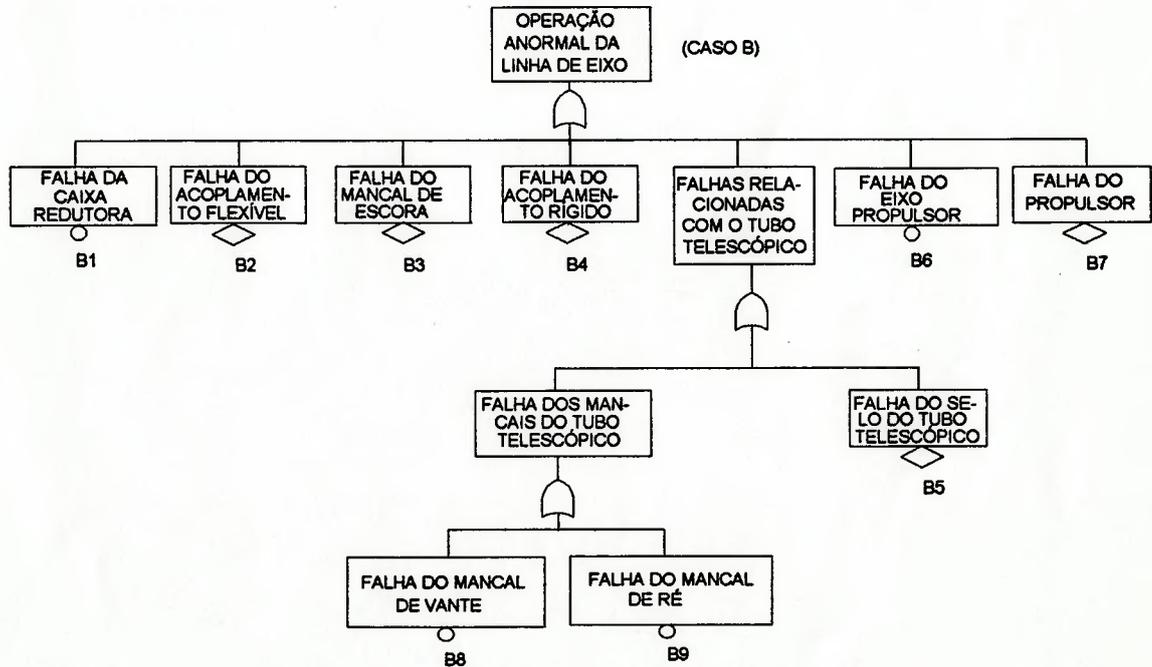


Figura 3.5 Árvore de falhas reduzida referente à perda da propulsão Caso B (incluindo os mancais do tubo telescópico)

3.4.2 Cálculo da disponibilidade

As falhas levantadas para a linha de eixo exigem que o submarino volte à base, pois não são reparáveis a bordo, o que é equivalente a dizer que os eventos básicos das árvores não têm reparo. Assim, o valor da disponibilidade do sistema no instante considerado é igual ao valor de sua confiabilidade no intervalo de tempo que vai do início da operação até o mesmo instante. Por simplicidade, será utilizado apenas o termo **disponibilidade** do sistema.

Como os componentes da linha de eixo são essencialmente mecânicos, será adotada a distribuição de Weibull para o tempo de vida dos eventos básicos das árvores de falha. Sendo a distribuição exponencial um caso particular da Weibull, esta condição também será analisada e comparada às demais.

Sendo $\Psi^A(Y)$ a função de estrutura para o caso A, tem-se:

$$\begin{aligned}\Psi^A(Y) &= 1 \text{ quando o evento topo ocorrer; e} \\ \Psi^A(Y) &= 0 \text{ caso contrário.}\end{aligned}$$

Sendo y_i a variável binária associada ao evento básico B_i , tem-se:

$$\begin{aligned}y_i &= 1 \text{ quando } B_i \text{ ocorrer; e} \\ y_i &= 0 \text{ caso contrário.}\end{aligned}$$

Assim:

$$\Psi^A(Y) = \prod_{i=1}^7 y_i = 1 - \prod_{i=1}^7 [1 - y_i] \quad (3.1)$$

A indisponibilidade do sistema para o caso A, $Q^A(t)$, é dada por:

$$Q^A(t) = \Pr(\text{evento topo ocorrer}) = \Pr[\Psi^A(Y) = 1] = E[\Psi^A(Y)] \quad (3.2)$$

Para facilidade de cálculo, pode-se trabalhar com a disponibilidade do sistema $A^A(t)$ que é o complementar da sua indisponibilidade.

$$A^A(t) = 1 - Q^A(t) = 1 - E[\Psi^A(Y)] \quad (3.3)$$

Assim:

$$A^A(t) = E\left[\prod_{i=1}^7 (1 - y_i)\right] \quad (3.4)$$

Como os eventos básicos são independentes, tem-se:

$$A^A(t) = [1 - E(y_1)] \cdot [1 - E(y_2)] \cdot \dots \cdot [1 - E(y_7)] \quad (3.5)$$

O valor esperado $E(y_i)$ é a probabilidade de ocorrência de B_i , ou seja:

$$E(y_i) = \Pr(B_i) \quad (3.6)$$

B_i ocorre no intervalo de tempo t se, e somente se, o componente i estiver indisponível em t ; isto implica na vida do componente i (V_i) ser menor ou igual a t . Assim, para a distribuição de Weibull, tem-se:

$$\Pr(V_i \leq t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\sigma_i}\right)^\beta} \quad (3.7)$$

onde:

σ é o parâmetro de escala para a distribuição de Weibull; e β é o parâmetro de forma da distribuição de Weibull.

Assim:

$$E(y_i) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\sigma_i}\right)^\beta} \quad (3.8)$$

o que leva a:

$$A^A(t) = e^{-\left[\sum_{i=1}^r \left(\frac{t}{\sigma_i}\right)^\beta\right]} \quad (3.9)$$

Analogamente, para o caso B, tem-se:

$$A^B(t) = e^{-\left[\sum_{i=1}^r \left(\frac{t}{\sigma_i}\right)^\beta\right]} \quad (3.10)$$

A referência RELIABILITY ANALYSIS CENTER (1991) fornece taxas médias de falha por unidade de tempo para componentes de aplicação comercial e militar. Estas taxas são valores representativos do inverso da vida média dos componentes, não implicando em dizer que os mesmos apresentam taxas constantes ao longo do tempo.

A Tabela 3.11 mostra as taxas médias de falha para os componentes da linha de eixo, bem como as informações complementares para a obtenção dessas taxas, constantes na referência citada.

Conforme pode-se observar, as taxas para o mancal de escora e para o propulsor são muito altas. Da experiência de operação de linhas de eixo, pode-se dizer que estes valores não expressam adequadamente a realidade. A razão deste fato talvez resida na forma como foram obtidas estas taxas. Provavelmente não tenham sido coletados dados suficientes para determinação precisa das mesmas. Esta suposição é reforçada ao verificar-se que os tempos de observação desses componentes são sensivelmente inferiores aos demais.

Tabela 3.11 Taxas médias de falhas por unidade de tempo para os componentes da linha de eixo

COMPONENTE	ÍNDICE DO COMPONENTE (i)	TAXA MÉDIA DE FALHAS (TF) (10 ⁻⁶ falhas/hora)	TEMPO DE OBSERVAÇÃO (10 ⁶ horas)	NÚMERO DE FALHAS NO TEMPO DE OBSERVAÇÃO	POPULAÇÃO OBSERVADA
Caixa redutora	1	19,2423	0,4158	8	16
Acoplamento flexível	2	1,4064	2,8442	4	65
Mancal de escora	3	251,3826	0,0040	0	128
Acoplamento rígido	4	0,8781	1,1388	0	26
Selo do tubo telescópico	5	0,3512	2,8470	0	65
Eixo propulsor	6	6,2566	0,1598	1	47
Propulsor	7	893,2518	0,0022	2	8
Mancal de vante do tubo	8	1,2059	3,3170	4	sem informações
Mancal de ré do tubo	9	1,2059	3,3170	4	sem informações

Sendo VM_i a vida média do componente i , tem-se, para a distribuição de Weibull:

$$VM_i = \sigma_i \cdot \Gamma\left(\frac{1+\beta_j}{\beta_j}\right) \quad (3.11)$$

onde $\Gamma\left(\frac{1+\beta_j}{\beta_j}\right)$ é o valor da função gama no ponto $\left(\frac{1+\beta_j}{\beta_j}\right)$.

Como:

$$VM_i = 1 / (TF)_i \quad (3.12)$$

tem-se:

$$\frac{1}{\sigma_i} = \Gamma\left(\frac{1+\beta_j}{\beta_j}\right) \cdot (TF)_i \quad (3.13)$$

Para avaliar a influência da forma da distribuição do tempo de vida de cada componente na disponibilidade da linha de eixo, deve-se fazer uma análise de sensibilidade. Para tal, varia-se o valor de β para o componente analisado fixando β para os demais. Por simplicidade, fixa-se $\beta=1$, que significa adotar a distribuição exponencial para a vida dos componentes que não estão em análise. Deve-se mencionar que, ao variar o parâmetro de forma da distribuição, sendo a taxa média de falhas constante, o parâmetro de escala da distribuição também estará sendo variado. Serão atribuídos

valores entre 0,5 e 5,0 para β , num total de quinze valores ($j=0,1,\dots,15$).

A tabela 3.12 fornece os valores de $(1/\sigma_i)^{\beta_j}$ a serem utilizados para o cálculo da disponibilidade da linha de eixo para as duas árvores de falha propostas (casos A e B).

Tabela 3.12 Valores de $(1/\sigma_i)^{\beta_j}$ para os casos A e B

j	β_j	$\Gamma\left(\frac{1+\beta_j}{\beta_j}\right)$	$\left(\frac{1}{\sigma_1}\right)^{\beta_j}$	$\left(\frac{1}{\sigma_2}\right)^{\beta_j}$	$\left(\frac{1}{\sigma_3}\right)^{\beta_j}$	$\left(\frac{1}{\sigma_4}\right)^{\beta_j}$	$\left(\frac{1}{\sigma_5}\right)^{\beta_j}$	$\left(\frac{1}{\sigma_6}\right)^{\beta_j}$	$\left(\frac{1}{\sigma_7}\right)^{\beta_j}$	$\left(\frac{1}{\sigma_{8,9}}\right)^{\beta_j}$
1	0,5	2,00000	0,00620	0,00168	0,02242	0,00133	0,00084	0,00354	0,04227	0,00155
2	0,7	1,26581	0,00059	0,00009	0,00356	0,00007	0,00004	0,00027	0,00866	0,00008
3	1,0	1,00000	1,92E-05	1,41E-06	2,51E-04	8,78E-07	3,51E-07	6,26E-06	8,93E-04	1,21E-06
4	1,3	0,92357	6,68E-07	2,23E-08	1,89E-05	1,21E-08	3,67E-09	1,55E-07	9,80E-05	1,82E-08
5	1,6	0,89657	2,39E-08	3,64E-10	1,46E-06	1,71E-10	3,95E-11	3,97E-09	1,11E-05	2,85E-10
6	2,0	0,88623	2,91E-10	1,55E-12	4,96E-08	6,06E-13	9,69E-14	3,07E-11	6,27E-07	1,14E-12
7	2,3	0,88591	1,08E-11	2,63E-14	3,98E-09	8,89E-15	1,08E-15	8,14E-13	7,35E-08	1,85E-14
8	2,6	0,88821	4,03E-13	4,48E-16	3,21E-10	1,32E-16	1,21E-17	2,17E-14	8,68E-09	3,00E-16
9	3,0	0,89298	5,07E-15	1,98E-18	1,13E-11	4,82E-19	3,08E-20	1,74E-16	5,07E-10	1,25E-18
10	3,3	0,89702	1,92E-16	3,41E-20	9,23E-13	7,21E-21	3,50E-22	4,70E-18	6,06E-11	2,05E-20
11	3,6	0,90110	7,25E-18	5,89E-22	7,56E-14	1,08E-22	3,99E-24	1,27E-19	7,26E-12	3,39E-22
12	4,0	0,90640	9,25E-20	2,64E-24	2,69E-15	4,01E-25	1,03E-26	1,03E-21	4,30E-13	1,43E-24
13	4,3	0,91016	3,52E-21	4,58E-26	2,22E-16	6,05E-27	1,17E-28	2,81E-23	5,17E-14	2,36E-26
14	4,6	0,91383	1,34E-22	7,97E-28	1,83E-17	9,13E-29	1,35E-30	7,64E-25	6,23E-15	3,93E-28
15	5,0	0,91817	1,72E-24	3,59E-30	6,55E-19	3,41E-31	3,49E-33	6,26E-27	3,71E-16	1,66E-30

A expressão geral da disponibilidade do sistema, considerando a variação de β individualmente por componente, para a distribuição de Weibull, será dada por:

$$A_{ij}(t) = e^{-\left\{ \sum_{k=1}^n \left(\frac{t}{\sigma_k} \right)^{\beta_j \delta_{ik} + (1 - \delta_{ik})} \right\}} \quad (3.14)$$

onde:

$A_{ij}(t)$ é a disponibilidade do sistema no instante t quando β assume o valor β_j para o componente i ;

$\delta_{ik}=1$ para $i=k$;

$\delta_{ik}=0$ para $i \neq k$;

n é o número de componentes da árvore ($n=7$ para o caso A e $n=9$ para o caso B);

i é o índice do componente a ser analisado; e

j é o índice do parâmetro β .

O tempo t considerado para o cálculo da disponibilidade do sistema é o tempo de missão previsto para o submarino, ou seja, o tempo que a embarcação deve permanecer em operação exigindo prontidão do sistema de propulsão. Este tempo é de 50 dias ou 1200 horas.

A Tabela 3.13 mostra os resultados obtidos para a disponibilidade da linha de eixo para a árvore do caso A. A última linha da tabela apresenta a variação percentual

máxima da disponibilidade do sistema para $\beta \geq 1,0$; os casos onde $\beta < 1,0$ representam taxas de falha decrescentes com o tempo e não se aplicam aos componentes em estudo, sendo, portanto, excluídos da análise.

Tabela 3.13 Disponibilidade do sistema de linha de eixo (caso A)

j	A _{1j}	A _{2j}	A _{3j}	A _{4j}	A _{5j}	A _{6j}	A _{7j}
1	0,2021	0,2314	0,1522	0,2340	0,2379	0,2182	0,1654
2	0,2303	0,2421	0,1989	0,2426	0,2435	0,2373	0,2072
3	0,2448	0,2448	0,2449	0,2448	0,2448	0,2448	0,2449
4	0,2488	0,2452	0,2736	0,2450	0,2449	0,2463	0,2666
5	0,2500	0,2452	0,2926	0,2450	0,2449	0,2466	0,2800
6	0,2504	"	0,3082	"	"	0,2466	0,2899
7	0,2505	"	0,3154	"	"	"	0,2942
8	0,2505	"	0,3204	"	"	"	0,2966
9	"	"	0,3246	"	"	"	0,2978
10	"	"	0,3266	"	"	"	0,2970
11	"	"	0,3279	"	"	"	0,2957
12	"	"	0,3291	"	"	"	0,2932
13	"	"	0,3297	"	"	"	0,2909
14	"	"	0,3301	"	"	"	0,2880
15	0,2505	0,2452	0,3304	0,2450	0,2449	0,2466	0,2841
(A _{i15} -A _{i3})/A _{i15} (%)	2,28	0,16	25,88	0,08	0,04	0,73	13,80

A Tabela 3.14 mostra os resultados obtidos para a disponibilidade da linha de eixo para a árvore do caso B. A última linha da tabela apresenta a variação percentual máxima da disponibilidade do sistema para a mesma condição da tabela anterior.

Tabela 3.14 Disponibilidade do sistema de linha de eixo (caso B)

j	A _{1j}	A _{2j}	A _{3j}	A _{4j}	A _{5j}	A _{6j}	A _{7j}	A _{8/9j}
1	0,2015	0,2307	0,1518	0,2333	0,2372	0,2175	0,1649	0,2317
2	0,2296	0,2414	0,1983	0,2419	0,2428	0,2366	0,2066	0,2417
3	0,2441	0,2441	0,2442	0,2441	0,2441	0,2441	0,2442	0,2441
4	0,2481	0,2445	0,2728	0,2443	0,2442	0,2455	0,2658	0,2444
5	0,2493	0,2445	0,2917	0,2443	0,2442	0,2458	0,2792	0,2444
6	0,2497	"	0,3073	"	"	0,2459	0,2890	"
7	0,2498	"	0,3145	"	"	0,2459	0,2934	"
8	0,2498	"	0,3195	"	"	"	0,2958	"
9	"	"	0,3236	"	"	"	0,2969	"
10	"	"	0,3256	"	"	"	0,2962	"
11	"	"	0,3270	"	"	"	0,2948	"
12	"	"	0,3282	"	"	"	0,2923	"
13	"	"	0,3287	"	"	"	0,2900	"
14	"	"	0,3291	"	"	"	0,2872	"
15	0,2498	0,2445	0,3295	0,2443	0,2442	0,2459	0,2832	0,2444
(A _{i15} -A _{i3})/A _{i15} (%)	2,28	0,16	25,89	0,08	0,04	0,73	13,77	0,12

Conforme pode-se observar nas tabelas 3.13 e 3.14, os valores obtidos para a disponibilidade do sistema são consideravelmente baixos, em torno de 24%. Tal fato se explica devido aos altos valores das taxas médias de falha do propulsor e do mancal de escora.

Estes componentes apresentam, também, a maior variação nos valores da disponibilidade em função da variação da forma da distribuição, porém, não devem ser levados em consideração já que não expressam a realidade.

Eliminando a influência destes componentes, pode-se dizer que a variação da disponibilidade do sistema em relação à forma da distribuição do tempo de vida dos equipamentos é pouco significativa quando comparada à variação devida à incerteza das taxas de falha. A disponibilidade sofre variações entre 0,04 e 2,28%, para $\beta \geq 1,0$.

Conclui-se, portanto, que pode ser utilizada a distribuição exponencial para o tempo de vida dos componentes, sem produzir erros significativos nos resultados da análise.

Quanto aos mancais do tubo telescópico, os valores obtidos para a disponibilidade nos casos A e B são praticamente iguais, ou seja, a falha destes componentes praticamente não afeta a disponibilidade do sistema. A máxima variação observada é de 0,3%. Cabe ressaltar que, se as taxas de

falha dos mancais fossem muito superiores, a influência na disponibilidade seria maior.

Em toda a bibliografia consultada não se encontrou referência a valores de disponibilidade de sistemas semelhantes. Porém, através da observação da operação de linhas de eixo, sabe-se que este valor é muito superior aos obtidos. Supondo valores de 10^{-5} e 10^{-6} falhas por hora para as taxas de falha de todos os componentes e adotando a distribuição exponencial, chega-se à disponibilidade de 91,9 e 99,1%, respectivamente, para o caso A e 89,8 e 98,9% para o caso B. Isto mostra claramente que as taxas do propulsor e do mancal de escora estão superestimadas.

Concluindo, é fundamental a obtenção de dados mais precisos sobre a falha dos componentes, para que se tenha valores de disponibilidade mais adequados à realidade.

3.4.3 Cálculo da disponibilidade média

A disponibilidade média (AM) da linha de eixo é dada por:

$$AM = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) \cdot dt \quad (3.15)$$

onde:

T é o tempo de missão previsto para o submarino que é de 50 dias ou 1200 horas.

Sendo AM_{ij} a disponibilidade média do sistema quando β assume o valor β_j para o componente i , tem-se:

$$AM_{ij} = \frac{1}{T} \int_0^T A_{ij}(t) \cdot dt \quad (3.16)$$

Substituindo (3.14) em (3.16), obtém-se:

$$AM_{ij} = \frac{1}{T} \int_0^T e^{-\left\{ \sum_{k=1}^n \left(\frac{t}{\sigma_k} \right)^{[\beta_j \delta_{ij} + (1 - \delta_{ik})]} \right\}} \cdot dt \quad (3.17)$$

Os valores de AM_{ij} foram calculados com o auxílio do programa *Mathematica* (WOLFRAM RESEARCH, INC., 1992).

As tabelas 3.15 e 3.16 apresentam os valores da disponibilidade média da linha de eixo para os casos A e B, respectivamente.

Uma análise dessas tabelas indica que as observações feitas para a análise da disponibilidade do sistema também se aplicam para a sua disponibilidade média. As variações observadas neste caso são ainda menores, o que reforça as conclusões já mencionadas.

Tabela 3.15 Disponibilidade média do sistema de linha de eixo (caso A)

j	AM _{1j}	AM _{2j}	AM _{3j}	AM _{4j}	AM _{5j}	AM _{6j}	AM _{7j}
1	0,479281	0,519428	0,388816	0,522888	0,527854	0,501880	0,352657
2	0,519911	0,533660	0,472338	0,534251	0,535233	0,528272	0,447376
3	0,536638	0,536630	0,536711	0,536617	0,536624	0,536626	0,536690
4	0,540279	0,536942	0,567623	0,536815	0,536705	0,537918	0,592580
5	0,541150	0,536976	0,583845	0,536833	0,536711	0,538138	0,630761
6	0,541397	0,536980	0,594623	0,536835	0,536711	0,538181	0,665664
7	0,541434	0,536981	0,598771	0,536835	"	0,538186	0,684831
8	0,541444	0,536981	0,601218	"	"	0,538186	0,699939
9	0,541448	"	0,603025	"	"	"	0,715694
10	0,541448	"	0,603781	"	"	"	0,724985
11	"	"	0,604250	"	"	"	0,732839
12	"	"	0,604616	"	"	"	0,741579
13	"	"	0,604775	"	"	"	0,747137
14	"	"	0,604877	"	"	"	0,751914
15	0,541448	0,536981	0,604959	0,536835	0,536711	0,538186	0,757482

Tabela 3.16 Disponibilidade média do sistema de linha de eixo (caso B)

j	AM _{1j}	AM _{2j}	AM _{3j}	AM _{4j}	AM _{5j}	AM _{6j}	AM _{7j}	AM _{8/9j}
1	0,478763	0,518852	0,388412	0,522307	0,527266	0,501329	0,352278	0,520124
2	0,519337	0,533063	0,471828	0,533654	0,534634	0,527684	0,446886	0,533369
3	0,536040	0,536029	0,536110	0,536016	0,536023	0,536025	0,536089	0,536016
4	0,539674	0,536341	0,566973	0,536213	0,536104	0,537315	0,591904	0,536286
5	0,540543	0,536375	0,583168	0,536232	0,536110	0,537534	0,630032	0,536314
6	0,540790	0,536379	0,593926	0,536234	0,536110	0,537578	0,664882	0,536317
7	0,540827	0,536379	0,598066	0,536234	"	0,537582	0,684020	0,536317
8	0,540838	"	0,600508	"	"	0,537583	0,699103	"
9	0,540841	"	0,602311	"	"	0,537583	0,714831	"
10	0,540841	"	0,603065	"	"	"	0,724106	"
11	"	"	0,603533	"	"	"	0,731946	"
12	"	"	0,603899	"	"	"	0,740671	"
13	"	"	0,604057	"	"	"	0,746218	"
14	"	"	0,604159	"	"	"	0,750986	"
15	0,540841	0,536379	0,604241	0,536234	0,536110	0,537583	0,756543	0,536317

3.5 Atualização bayesiana dos dados de falha

Os resultados do estudo de confiabilidade mostraram uma disponibilidade muito baixa da linha de eixo. Não é de se esperar que isto possa ocorrer com embarcações que têm

requisitos de desempenho tão exigentes, como é o caso dos submarinos.

Esses resultados decorrem, provavelmente, de valores incorretos admitidos para os parâmetros da distribuição utilizada. Tendo sido verificado que a forma da distribuição não afeta significativamente a disponibilidade da linha de eixo, é coerente admitir que o tempo de vida dos equipamentos envolvidos segue uma distribuição exponencial. Para este modelo, o parâmetro de interesse é a taxa de falhas, λ , assim, pode-se efetuar a atualização desses valores, refinando as taxas utilizadas a priori.

Isto torna-se possível com a implementação do método de atualização bayesiana.

Como as informações para obtenção das taxas de falhas são insuficientes, existem incertezas a respeito de seu valor real. Estas incertezas podem ser levadas em consideração através da escolha de uma curva de distribuição de probabilidade para cada uma das taxas dos eventos básicos. É conveniente que se tenha informações a respeito dos equipamentos para os quais estão sendo alocadas taxas de falhas, de forma que as curvas de distribuição de probabilidade sejam corretamente selecionadas.

Através da operação do sistema de linha de eixo, novas evidências práticas são obtidas. Estas observações são

fundamentais para que as taxas específicas dos componentes se ajustem à realidade. A incorporação destas informações às curvas de distribuição das taxas de falhas se faz utilizando o teorema de Bayes.

3.5.1 Metodologia

O teorema de Bayes é considerado a lei fundamental da inferência lógica e a regra básica para a combinação de dados, permitindo a dedução de conclusões gerais a partir de informações obtidas da experiência prática. Na sua forma mais simples, é dado por:

$$\Pr(E_1 / E_2) = \Pr(E_1) \cdot \left[\frac{\Pr(E_2 / E_1)}{\Pr(E_2)} \right] \quad (3.18)$$

onde:

$\Pr(E_1/E_2)$ é a probabilidade condicional de ocorrência do evento E_1 dada a ocorrência do evento E_2 ;

$\Pr(E_1)$ é a probabilidade do evento E_1 antes da ocorrência do evento E_2 ;

$\Pr(E_2/E_1)$ é a probabilidade condicional do evento E_2 dada a ocorrência do evento E_1 ; e

$\Pr(E_2)$ é a probabilidade de ocorrência do evento E_2 .

Na aplicação ao presente trabalho, onde é feita a atualização de taxas de falhas λ de um dado equipamento, pode-se escrever o teorema de Bayes como:

$$p(\lambda/E) = \frac{p(\lambda) \cdot L(E/\lambda)}{\int_0^{\infty} p(\lambda) \cdot L(E/\lambda) \cdot d\lambda} \quad (3.19)$$

onde:

$p(\lambda/E)$ é a distribuição de probabilidade posterior da taxa da falhas λ , após a nova evidência prática (E);

$p(\lambda)$ é a distribuição de probabilidade a priori da taxa de falhas λ , ou seja, antes de qualquer evidência prática;

$L(E/\lambda)$ é a probabilidade de que a evidência fosse observada se a taxa de falhas fosse λ , chamada de função de verossimilhança; e

$\int_0^{\infty} p(\lambda) \cdot L(E/\lambda) \cdot d\lambda$ é um fator de normalização.

Muitas vezes, a avaliação de (3.19) não pode ser realizada analiticamente. Para formas específicas da função de

verossimilhança, o uso de distribuições conjugadas entre a função de verossimilhança e a distribuição de probabilidade a priori, facilita bastante o cálculo sendo possível a solução analítica da integral. Para o caso do tempo de vida de componentes com distribuição exponencial, pode-se adotar para a distribuição a priori, a função densidade da distribuição gama, uma vez que esta função é bastante flexível, permitindo o ajuste de, praticamente, quaisquer dados da experiência a priori. Esta distribuição tem, ainda, a propriedade de gerar uma distribuição posterior da taxa de falhas também do tipo gama.

No entanto, para não restringir a aplicação da metodologia ao caso de famílias de distribuições conjugadas, as distribuições contínuas de (3.19) serão aproximadas por suas formas discretizadas. Assim, o teorema de Bayes assume a seguinte forma:

$$p(\lambda = \lambda_n / E) = \frac{p(\lambda = \lambda_n) \cdot L(E / \lambda = \lambda_n)}{\sum_{n=1}^N p(\lambda = \lambda_n) \cdot L(E / \lambda = \lambda_n)} \quad (3.20)$$

onde:

N é o número de intervalos utilizados para discretização; e

λ_n é a variável aleatória discreta que representa a taxa de falhas do equipamento.

As evidências experimentais para componentes/equipamentos em análises de confiabilidade podem ser do tipo demanda ou do tipo temporal. Evidências do tipo demanda são aquelas observadas em dispositivos que permanecem em prontidão até serem solicitados, ou seja, falham quando ocorre uma demanda. Evidências do tipo temporal são obtidas para dispositivos que operam continuamente e sofrem uma falha em um determinado instante de tempo durante a operação.

No caso específico do sistema de linha de eixo, as evidências são todas do tipo temporal, ou seja, são observadas k falhas de um determinado equipamento durante um período total de observação T . Neste caso, a função de verossimilhança pode ser expressa pela distribuição de Poisson, dada por:

$$L(E/\lambda = \lambda_n) = \frac{(\lambda_n \cdot T)^k \cdot e^{-\lambda_n \cdot T}}{k!} \quad (3.21)$$

Assim, o teorema de Bayes pode ser reescrito como:

$$p(\lambda = \lambda_n / E) = \frac{p(\lambda = \lambda_n) \cdot \lambda_n^k \cdot e^{-\lambda_n \cdot T}}{\sum_{n=1}^N p(\lambda = \lambda_n) \cdot \lambda_n^k \cdot e^{-\lambda_n \cdot T}} \quad (3.22)$$

onde:

λ_n é a variável aleatória discreta que representa a taxa de falhas temporal para um dado equipamento da linha de eixo.

O método exposto é conhecido como método bayesiano de atualização de dados de um estágio, conforme APOSTOLAKIS, (1980).

A implementação da atualização bayesiana para as taxas de falha dos componentes da linha de eixo torna-se possível através da observação e registro de dados de funcionamento do próprio sistema e de sistemas que operem em condições semelhantes à analisada.

É importante que este registro seja feito seguindo o modelo da **Figura 2.8 Relatório para obtenção de taxas de falhas**, para que todas as características das observações fiquem documentadas. Isto permite formar um histórico das falhas, bem como caracterizar seus possíveis modos.

Pode-se iniciar o processo de atualização de dados após a identificação de qualquer evidência prática. Porém, o acúmulo de informações obtidas após tempos de observação maiores leva a dados mais específicos para o sistema.

4 CONCLUSÕES

Foi apresentado neste trabalho o procedimento de análise de confiabilidade pelo método de árvore de falhas e sua aplicação ao sistema de linha de eixo de um submarino com propulsão nuclear. Para a quantificação da análise utilizou-se as informações da referência RELIABILITY ANALYSIS CENTER (1991) que contém dados de falha de componentes para aplicação comercial e militar.

No estudo de confiabilidade foram examinados os efeitos da forma da distribuição do tempo de vida dos componentes e da falha de um componente sobre a disponibilidade da linha de eixo. Foi efetuada uma análise de sensibilidade através da variação dos parâmetros da distribuição de Weibull adotada para o tempo de vida dos componentes. A influência da falha dos mancais do tubo telescópico na disponibilidade do sistema foi analisada através do estudo comparativo de dois casos: caso A - perda da propulsão excluindo a falha dos mancais do tubo telescópico; e caso B - perda da propulsão incluindo a falha dos mancais do tubo telescópico.

Finalmente, foi desenvolvida a metodologia bayesiana para atualização e especialização das taxas de falha dos componentes utilizadas na análise.

A aplicação da metodologia de análise de confiabilidade através da utilização do modelo de árvore de falhas

mostrou-se adequada ao sistema de linha de eixo. Este modelamento revelou aspectos importantes, evidenciando problemas já conhecidos.

O principal aspecto a ser ressaltado é a inadequação dos dados de falha. Na grande maioria das análises de confiabilidade, a mais importante restrição quanto aos resultados obtidos reside na falta de credibilidade das taxas de falhas utilizadas. Os dados disponíveis muitas vezes são distantes e discrepantes da realidade em análise por pertencerem a bases de dados internacionais. Além disso, não há informações de como foram obtidos e a que condições se aplicam. Isto leva a incertezas consideráveis nos resultados. No caso do sistema de linha de eixo, estes dados são escassos, restringindo-se àqueles constantes na referência citada.

Pode-se dizer que os valores de disponibilidade extremamente baixos obtidos para o sistema, da ordem de 24%, são consequência do acima exposto. Apesar de não haver referências que apresentem valores comparativos para sistemas semelhantes, sabe-se que a disponibilidade da linha de eixo é bastante superior à obtida. Isto implica na constatação de que as taxas de falha consideradas para o propulsor e para o mancal de escora, entre 10^{-3} e 10^{-4} falhas por hora, não representam adequadamente a realidade.

Este problema pode ser resolvido através da conscientização da importância do registro e acúmulo de dados de falha, com a formação de um banco de dados específico que considere as falhas dos equipamentos em condições de operação semelhantes à condição em análise.

A aplicação da técnica de análise de modos de falha e efeitos (AMFE) para o sistema de linha de eixo permitiu o detalhamento de todos os possíveis modos de falha de cada componente.

Verificou-se que a influência da falha dos mancais sobre a disponibilidade da linha de eixo é muito pequena.

A análise de sensibilidade da disponibilidade do sistema em relação ao parâmetro de forma da distribuição mostrou que, excluindo os casos anômalos, as variações são pequenas; ou seja, a influência da forma da distribuição não é significativa quando comparada à influência das taxas de falha.

Como consequência desta observação, a distribuição exponencial pode ser adotada para o tempo de vida dos equipamentos sem produzir erros significativos nos resultados.

Deve-se ressaltar, ainda, a importância do processo de atualização dos dados de falha. Através da metodologia

bayesiana, pode-se direcionar as taxas de falhas utilizadas na análise, para taxas mais específicas, com a incorporação de observações práticas das falhas dos equipamentos.

Finalizando, é relevante mencionar a necessidade de refinamento da análise aqui apresentada. Recomenda-se as seguintes tarefas:

a) verificar as taxas constantes na referência RELIABILITY ANALYSIS CENTER (1991), contactando diretamente a organização responsável por sua elaboração; esclarecer os seguintes pontos: qual o procedimento utilizado na obtenção de tais taxas, a que condições se aplicam, quais os modos de falha identificados para cada taxa e qual a contribuição de cada um desses modos para a taxa total; e

b) implementar a rotina de preenchimento de relatórios para obtenção de taxas de falha de componentes de linha de eixo, mesmo para embarcações convencionais; um banco de dados adequado, obtido a partir de registros sistematizados de falha, permite a identificação dos possíveis modos de falha, bem como suas taxas, possibilitando assim a atualização bayesiana dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, A. O. *Probability, Statistics, and Queueing Theory with Computer Science Applications*, Academic Press, Inc., Orlando, Florida, 1978.
- APOSTOLAKIS, G.; KAPLAN, S.; GARRICK, B. J.; DUPHILY, R. J. *Data Specialization for Plant Specific Risk Studies*, Nuclear Engineering and Design, v. 56, p. 321-29, 1980.
- AVEN, T. *Reliability Achievement - The Commercial Incentive*, Elsevier Applied Science, 1989.
- BARLOW, R. E.; PROSCHAN, F. H. *Mathematical Theory of Reliability*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
- BARLOW, R. E.; SCHEUER, E. M. *An Introduction to Reliability Theory*, CEIR, Inc., 1969.
- FUSSELL, J. B.; BURDICK, G. R. *Nuclear Systems Reliability Engineering and Risk Assessment*, SIAM, Philadelphia, 1977.
- JURAN, J. M., RYNA, F. M. *Controle da Qualidade - Handbook - Conceitos, Políticas e Filosofia da Qualidade*, Makron Books do Brasil Editora Ltda., São Paulo, 1991, v. 1.
- RELIABILITY ANALYSIS CENTER. *Nonelectronic Parts Reliability Data - 1991 - NPRD-1991*, Department of Defense Information Analysis Center of the United States of America, N. Y., 1991.
- RESEARCH TRIANGLE INSTITUTE. *Practical Reliability*, National Aeronautics and Space Administration, 1968.
- RIDDICK; HARRINGTON. *Reliability Engineering Applied to the Marine Industry*, Marine Technology, 1964.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, INC. *Reliability Control in Aerospace Equipment Development*, SAE Technical Progress Series, 1963.
- USNRC. *Reactor safety Study - An Assessment of Accident Risks in U. S. Commercial Nuclear Power Plants - WASH-1400 (NUREG-75/014)*, Springfield, Virginia, 1975.
- VANNOY, E. H. *Improving "MIL - HDBK - 217 TYPE" Models for Mechanical Reliability Prediction*, 1990 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1990.

WOLFRAM RESEARCH, INC. **Mathematica - A System for Doing Mathematics by Computer**, Version 2.1 for Windows - 1988-92, Microsoft, Inc., 1992.

WOODWARD. **Reliability Theory in Marine Engineering**, SNAME - Local Section Papers - Great Lakes/Great Rivers, 1963.

Bibliografia recomendada

BARLOW, R. E.; FUSSELL, J. B.; SINGPURWALLA, N. D. **Reliability and Fault Tree Analysis**, SIAM, Philadelphia, 1975.

FRANKEL, E. G., **Systems Reliability and Risk Analysis**, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1988.

HENLEY, E. J.; KUMAMOTO, H. **Reliability Engineering and Risk Assessment**, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1981.

KAPUR, K. C.; LAMBERSON, L. R. **Reliability in Engineering Design**, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1977.

SIEWIOREK, D. P.; SWARZ, R. S. **The Theory and Practice of Reliable System Design**, Digital Press, Bedford, Massachusetts, 1982.

Apêndice

Serão detalhadas, neste apêndice, as informações necessárias para o preenchimento do relatório para obtenção de taxas de falhas apresentado na Figura 2.8 da seção 2.7.1.

O formulário deve ser preenchido pelo responsável de cada equipamento na instalação, conforme se segue.

a) Campo 1

Identifica o navio, o sistema e o equipamento para o qual o relatório está sendo preenchido, bem como a data de início de preenchimento, o número do relatório e o nome do responsável pelo equipamento na embarcação.

b) Campo 2

Identifica o estado em que o equipamento se encontra, ou seja, se ele está ligado, se foi avariado, se foi desligado para ser submetido a uma manutenção preventiva ou se foi desligado conforme previsto na operação normal do sistema durante a missão da embarcação. É importante que se tenha a informação do desligamento e partida do equipamento durante a operação normal do sistema, para que seja possível obter o tempo total real de operação do equipamento. Este campo registra o dia/mês/ano, hora/minuto e situação do horímetro do equipamento (se houver) para cada mudança de estado.

c) Campo 3

Identifica o tipo de manutenção requerida pelo equipamento, ou seja, manutenção preventiva ou corretiva e quais ações foram necessárias.

d) Campo 4

Identifica a avaria ocorrida no equipamento. Se não houver ocorrido nenhum tipo de avaria, este campo não deve ser preenchido.

d.1) Campo 4A

Identifica qual o tipo de avaria ocorrida e qual o equipamento atingido.

d.2) Campo 4B

Identifica em que condições foi constatada a avaria, ou seja, se foi durante a operação normal, durante a manutenção, durante a inspeção, etc.. Podem ser assinaladas quantas condições forem necessárias.

d.3) Campo 4C

Identica qual o efeito da avaria no equipamento, ou seja, se este se tornou inoperante, se opera com restrições, etc..

d.4) Campo 4D

Identifica quais os sintomas de alteração na operação do sistema, ou seja, se este se encontra com vibração excessiva, vazão incorreta, etc.. Podem ser assinalados tantos sintomas quantos forem necessários.

d.5) Campo 4E

Identifica as causas da avaria através dos possíveis elementos responsáveis pelas mesmas, indicando o estado em que esses elementos se encontram e as causas que levaram esses elementos ao estado degradado. Podem ser indicados diversos estados e diversas causas.

d.6) Campo 4F

Identifica o tempo efetivo de reparo, onde a primeira coluna registra as datas de início e reinício após interrupção do reparo; a segunda coluna registra as datas de interrupção e final de reparo; a terceira coluna contabiliza o tempo gasto em cada etapa do reparo.

e) Campo 5

Registra as observações pertinentes, podendo conter informações complementares referentes a qualquer campo, bastando indicar o campo a que se referem.