

São Paulo  
2004

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do  
Título de Mestre em Engenharia.  
Área de Concentração:  
Engenharia Naval  
Orientador:  
Prof. Livre-Docente  
Hélio Mito Morishita

**ANÁLISE CRÍTICA DA APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO  
CENTRADA EM CONFIABILIDADE E EM RISCO**

**BRUNO JEAN JACQUES CORNET**

**BRUNO JEAN JACQUES CORNET**

**ANÁLISE CRÍTICA DA APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO  
CENTRADA EM CONFIABILIDADE E EM RISCO**

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

São Paulo  
2004

CONSULTA  
FD-3745  
Ed.rev.

012

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 02 de maio de 2004

Bruno Jean Jacques Cornet (Autor)

Hélio Mito Morishita (Orientador)

## FICHA CATALOGRÁFICA

Cornet, Bruno Jean Jacques  
Análise crítica da aplicação da manutenção centrada em  
confiabilidade e em risco. São Paulo, 2004.  
106p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1. Confiabilidade 2. Manutenção 3. Riscos  
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de  
Engenharia Naval e Oceânica II.L

## AGRADECIMENTOS

Ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Hélio Mítio Morishita pela paciência inabalável, pelas noites e fins de semanas dedicados e pela incansável persistência no desenvolvimento de seus alunos e na busca contínua por excelência no ensino de engenharia na universidade pública.

À minha esposa pela paciência, apoio e incentivo.

Aos colegas do grupo Solvay e da ABB Service que me auxiliaram fornecendo dados, informações e participando de discussões e experiências sobre os assuntos tratados neste texto. Em especial, agradeço aos senhores Carlos T. Hodel e José A. Baptista que contribuíram com referências, orientações e experiência.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho.

O presente trabalho apresenta os principais conceitos, definições e ferramentas para análise de confiabilidade e de riscos e busca reforçar a idéia de que a confiabilidade deve ser estudada de forma ampla e adaptada às necessidades e objetivos de cada estudo e não apenas baseada em ferramentas ou técnicas disponíveis no mercado. O texto se concentra em demonstrar as bases conceituais de cada ferramenta e a forma de utilizar estas bases para obtenção de resultados práticos e eficazes. É apresentado um exemplo prático de estudo abrangendo alguns dos conceitos citados e principalmente demonstrando a necessidade de orientar cada estudo de acordo com o objetivo final para o qual os resultados serão utilizados.

## **RESUMO**

## **ABSTRACT**

This work presents the main concepts, definitions and tools for reliability and risk analysis and searches to strengthen the idea that reliability must be studied on a wider approach, adapted to the necessities and goals of each study and not only based on tools or techniques available in the market. The text focuses on demonstrating the conceptual bases of each tool and the way to use these bases for the achievement of practical and efficient results. A practical example of study is presented enclosing some of the cited concepts and specially demonstrating the need to orientate each study according to the final objective for which the results will be applied.

# SUMÁRIO

## SUMÁRIO

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

### LISTA DE SÍMBOLOS

1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1.2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
1.3 - OBJETIVOS .....	10
1.4 - ESTRUTURA DO TRABALHO .....	11
<b>2 - TEORIA DA CONFIABILIDADE E QUANTIFICAÇÃO DO RISCO .....</b>	<b>14</b>
2.1 - DEFINIÇÕES .....	14
2.1.1 - Tempo Médio Para Falhar .....	23
2.1.2 - Tempo Médio Entre Falhas .....	24
2.1.3 - Tempo Médio Entre Intervenções .....	25
2.1.4 - Disponibilidade .....	25
2.2 - SISTEMAS COMPLEXOS .....	29

2.2.1 - Sistema em série.....	29
2.2.2 - Sistema em paralelo.....	29
2.3 - PADRÕES DA FALHA .....	30
2.3.1 - A tradicional curva da banheira .....	31
2.3.2 - Taxa de falhas crescente ao final da vida útil .....	34
2.3.3 - Taxa de falhas com crescimento constante .....	34
2.3.4 - Baixa mortalidade infantil .....	35
2.3.5 - Taxa de falhas constante .....	36
2.3.6 - Alta mortalidade infantil.....	37
2.3.7 - Associações .....	37
<b>3 - FERRAMENTAS DE ANÁLISE.....</b>	<b>39</b>
3.1 - CONSIDERAÇÕES.....	39
3.2 - HAZOP.....	39
3.3 - ÁRVORE DE FALHAS OU SUCESSO .....	41
3.3.1 - Árvore de falhas.....	41
3.3.2 - Árvore de sucessos .....	45
3.3.3 - Árvore de eventos .....	45
3.4 - FMEA E FMCA.....	45
3.5 - RCM.....	46



## **4 - CONFIABILIDADE NA INDÚSTRIA E EM**

**PROJETOS.....49**

4.1 - CONFIABILIDADE NA MANUTENÇÃO.....49

4.1.1 - Evolução da manutenção.....49

4.1.2 - Técnicas de confiabilidade na manutenção.....50

4.1.3 - Importância da confiabilidade na manutenção.....50

4.2 - A EXTENSÃO PARA A OPERAÇÃO DE SISTEMAS

COMPLEXOS.....53

4.3 - CONFIABILIDADE NA FASE CONCEITUAL.....63

4.4 - A FASE DE TESTES – O MODELO DE DUANE.....64

**5 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO.....66**

5.1 - CONTEXTO.....66

5.2 - DESCRIÇÃO DO MALAXADOR.....68

5.3 - DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA DE ANÁLISE.....72

5.3.1 - Princípio.....72

5.3.2 - Sistema e Sub-Sistemas.....72

5.3.3 - Planilha.....74

5.3.4 - Análise de Confiabilidade e Riscos.....84

5.4 - RESULTADOS DO ESTUDO.....90

**6 - CONCLUSÕES .....92**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Função de densidade de probabilidade .....	21
Figura 2 - Função de Distribuição Cumulativa.....	21
Figura 3 - Confiabilidade Ótima.....	26
Figura 4 - Diagrama de Blocos de Sistema em Série.....	29
Figura 5 - Diagrama de Blocos de Sistema em Série.....	30
Figura 6 - Curva da banheira .....	32
Figura 7 - Taxa de falhas crescente ao final da vida útil .....	34
Figura 8 - Taxa de falhas com crescimento constante .....	35
Figura 9 - Taxa de falhas com baixa mortalidade infantil .....	36
Figura 10 - Taxa de falhas constante .....	36
Figura 11 - Alta mortalidade infantil .....	37
Figura 12 - Baixa mortalidade infantil e desgaste .....	38
Figura 13 - Símbolos para Construção de Árvores de Falhas.....	42
Figura 14 - Exemplo de Sistema Complexo .....	43
Figura 15 - Árvore de Falhas .....	44
Figura 16 - Exemplo de árvore de falhas para impacto ambiental .....	54
Figura 17 - Exemplo de Diagrama de Ishikawa para impacto ambiental .....	55
Figura 18 - Parte de Matriz de Aspectos e Impactos Ambientais.....	56
Figura 19 - Exemplo de Árvore de Falhas para evento de operação .....	57
Figura 20 - Exemplo de Diagrama de Ishikawa para evento de operação.....	58
Figura 21 - Exemplo de Árvore de Falhas para evento de segurança.....	60
Figura 22 - Exemplo de Análise de Riscos do Trabalho .....	62
Figura 23 - Esquema simplificado de um malaxador .....	70
Figura 24 - Foto de Malaxador com Corpo Bi-partido.....	71
Figura 25 - Foto de Malaxador Convencional .....	71
Figura 26 - Função de densidade de probabilidade por custo .....	89
Figura 27 - Função de distribuição cumulativa por custo.....	89

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAMAN	- Associação Brasileira de Manutenção
ALARP	- As Low As Reasonably Practicable
FMEA	- Failure Modes and Effects Analysis
FMECA	- Failure Modes, Effects and Criticality Analysis
HAZOP	- Hazard and Operability
MTBF	- Mean Time Between Failures
MTBR	- Mean Time Between Repairs
MTTF	- Mean Time To Failure
MTTR	- Mean Time To Repair
OEE	- Overall Equipment Efficiency
PE	- Politécnico
RCM	- Reliability-Centered Maintenance
RBM	- Risk-Based Maintenance
RPN	- Risk Priority Number
SAE	- Society of Automotive Engineers

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P\{X\}$	Probabilidade de um evento X
N	Número de eventos possíveis
$n_x$	Número de ocorrências de X
n	Número de tentativas
$n_f$	Número de falhas
C	Evento certo
$R(t)$	Confiabilidade
$f(t)$	Função de densidade de probabilidade
$F(t)$	Função de distribuição cumulativa
$\lambda(t)$	Taxa de falhas
$E(t)$	Esperança de $f(t)$
$M(t)$	Manutenibilidade
T	Tempo de operação
$\alpha$	Fator de crescimento
$M_c$	MTBF acumulado
$M_i$	MTBF instantâneo
M.A.	Define risco intolerável para o meio ambiente
Seg.	Define risco intolerável para a segurança de pessoas ou instalações
Custo Qual.	Custo de produção de produtos não-conformes
$F_x$	Probabilidade de falha relacionada a um modo de falha X
$R_x$	Confiabilidade relacionada a um modo de falha X
m	Número de modos de falhas possíveis
$C_m$	Número de combinações de falhas possíveis em um mês

considerando m modos de falha.

# 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nos últimos anos, no Brasil, tem ocorrido uma cobrança sobre a manutenção, de diversas origens, exigindo que esta área se responsabilize pela execução de FMEA ("Análise de Modos e Efeitos de Falhas"). Com a discussão que se criou ao redor desta ferramenta, clientes, auditores de seguros, auditores de qualidade e também, a alta direção da empresa têm exigido da área de manutenção a utilização desta técnica de forma indiscriminada. Surgiu um novo paradigma sobre o uso desta ferramenta: mesmo sem saber por que, já que os clientes, concorrentes e outras empresas estão aplicando FMEA, criou-se um consenso generalizado de que as empresas devem hoje necessariamente aplicar esta técnica.

Por outro lado, os profissionais da área de manutenção, aprofundando-se um pouco mais no assunto, têm criado uma discussão efervescente sobre confiabilidade na indústria. Com a apresentação recente de sistemáticas simplificadas de análise em áreas de projeto e manutenção, como RCM ("Reliability-Centered Maintenance" ou Manutenção Centrada em Confiabilidade), desenvolvida na aeronáutica civil norte-americana nos anos 70, e RCM2, apresentada por John Moubray nos anos 90, a área de manutenção tem popularizado na indústria mundial e especialmente, na indústria brasileira, um novo enfoque, abordado inicialmente apenas na indústria aeronáutica. A confiabilidade tem sido tema de debate constante entre engenheiros, prestadores de serviços e consultores da área de manutenção e tem servido de assunto central em seminários e cursos sobre manutenção. O dia-a-dia da indústria nacional deixa transparecer hoje que, enquanto se exige das áreas de manutenção a realização de FMEA, estas já buscam ir um pouco além, ao, partindo do FMEA, desenvolverem estudos de RCM.

A motivação para este trabalho partiu da percepção de que toda discussão sobre FMEA e Confiabilidade, que ocorre atualmente no meio industrial, é superficial, não remete às suas origens e raramente discute soluções ou técnicas alternativas ao FMEA ou ao RCM para se alcançar os objetivos ou os resultados esperados. A discussão, em geral, não leva em consideração os objetivos reais do

negócio antes da implementação destas sistemáticas. O desenvolvimento deste trabalho surgiu também da insatisfação, da curiosidade e, portanto, da necessidade de se entender e responder aos seguintes questionamentos:

- O que é a confiabilidade?
- Como se mede a confiabilidade?
- O que afeta a confiabilidade?
- Como se ganha confiabilidade?

Ao se buscar responder a estas perguntas, surgiu naturalmente a necessidade de entender também o que era o risco, como este é medido e qual sua correlação com a confiabilidade.

Este trabalho deixará claro mais adiante que a confiabilidade nem sempre é o objetivo central da empresa e, portanto, a tendência de centralizar os objetivos da manutenção ou da produção em confiabilidade não permite alcançar os objetivos reais do negócio. Na indústria aeronáutica e naval, onde surgiu a base da manutenção centrada em confiabilidade, fica claro que a confiabilidade deve ser o objetivo central dos projetos e da manutenção e esta grandeza deve ser avaliada e monitorada para cada sistema. Em outras áreas, a confiabilidade nem sempre é um objetivo.

A pressão por redução de custos e ainda aumento de segurança, disponibilidade, produtividade, qualidade e ainda diminuição de impactos ambientais tem sido uma equação muito complexa para ser otimizada hoje pela engenharia e até para ser definida pelos usuários ou seus resultados quantificados. Os clientes de engenharia querem saber qual a segurança, disponibilidade, produtividade, qualidade e riscos ambientais oferecidos por um equipamento ou instalação e em geral existe muita dificuldade em quantificar estes dados tanto pelo cliente como pelos engenheiros fornecedores de projetos de instalações.

Até recentemente, os engenheiros industriais e de projetos procuravam otimizar a busca por estes objetivos de forma independente ou pelo menos, sem levar em consideração correlações diretas.

A confiabilidade e a análise de riscos demonstram ser os elos permitindo a busca contínua por redução de custos de investimento, manutenção e operação com aumento de segurança, disponibilidade e produtividade de plantas e

equipamentos. A confiabilidade e a análise de riscos em todos os aspectos de engenharia garantem a busca simultânea por cada um destes fatores e sua otimização. O conceito de confiabilidade, apesar de conhecido há décadas e provavelmente há séculos, só pode ser utilizado hoje de forma prática em qualquer atividade de engenharia graças à capacidade atual de armazenamento e processamento de dados, às recentes pesquisas alterando a base de conhecimentos sobre falhas e probabilidade de falhas e graças ao conjunto de conceitos e técnicas que surgiram nos últimos anos. É apenas graças a todo este desenvolvimento que a busca por confiabilidade pode se tornar de fato um estudo sistemático e quantificável.

Verifica-se de fato que a confiabilidade e a análise de riscos estão naturalmente se transformando em uma disciplina completa, indispensável ao desempenho da engenharia da forma como existe hoje. Se por um lado, a confiabilidade tem ganhado impulso na indústria, não tem havido a devida preocupação para incorporar estes conceitos na formação dos engenheiros.

Segundo Woltram; Owen (1991) as principais recomendações do relatório Cullen a respeito do acidente da Piper Alpha, referem-se a necessidades de formação e treinamento em segurança e confiabilidade. De acordo com sua pesquisa, realizada em 1991, no Reino Unido, apenas a formação em engenharia química exigia formalmente o aprendizado de matérias de confiabilidade. Constatou-se que dos 6 cursos de graduação explicitamente direcionados à indústria offshore, um tinha 25 horas de aulas relacionadas à confiabilidade, outro 8 horas e os quatro outros previam citar conceitos entre outras disciplinas. Ainda segundo estes autores, fica claro por estes resultados que é urgente a formação aprofundada em confiabilidade de engenheiros atuando na área de offshore e naturalmente esta formação traria também benefícios para indústrias de outros setores.



Os primeiros estudos aprofundados em confiabilidade surgiram na indústria aeroespacial norte-americana, inicialmente com o objetivo de aperfeiçoar projetos e equipamentos novos. O principal trabalho da época é o de Duane (1965), que serve de referência para muitos autores no que se refere a ganhos de confiabilidade baseados em testes e ensaios. Duane sugere um modelo de curva de aprendizado para uso em análise de confiabilidade e propõe quantificar o número de ensaios ou o tempo necessário para se alcançar uma confiabilidade desejada. O modelo se baseia no ganho de confiabilidade com o ganho de experiência.

engenhheiros elétricos.

que aqueles utilizados por Papoulis (1984), voltado mais especificamente para lado, estes trabalhos são mais ilustrativos e utilizam exemplos mais diversificados discussões ou conceitos, são os livros de Lapin (1990) e DeGroot (1984). Por outro referências voltadas para engenheiros, porém, sem se aprofundar muito em de forma bastante objetiva, as diferentes definições de probabilidade. Outras conceitos clássicos e intuitivos. Vale ressaltar o início de seu livro, quando apresenta bastante matemática ao longo do seu livro sem, porém, deixar de apresentar e criticar definições, é feita por Papoulis (1984). Para tanto, Papoulis utiliza uma abordagem mais profunda, voltada para engenheiros, sobre probabilidade e suas diversas sobre os conceitos e noções fundamentais acerca das probabilidades. Uma discussão seu primeiro capítulo, de introdução, que apresenta uma discussão muito didática esta publicação é reconhecida pelo conjunto da abordagem conceitual, inclusive em Apesar de chegar a discutir aspectos de probabilidades aplicados à confiabilidade, das principais referências bibliográficas de cursos de probabilidades de graduação. fundamentais, foi utilizado, como referência, o livro de Meyer (1983). Esta é uma em diversas obras didáticas a este respeito. Como base de conceitos e noções análise de confiabilidade e riscos, efetuou-se uma revisão geral de conceitos, baseada Sendo o estudo de probabilidades e estatísticas a base de qualquer trabalhos mais recentes e outros específicos da área naval e oceânica.

Para complementação deste estudo foi efetuado um trabalho de revisão bibliográfica baseado nos principais autores sobre confiabilidade assim como

## 1.2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um trabalho mais recente, porém com um conteúdo bastante didático e com enfoque em suprir alunos de graduação em engenharia em suas deficiências nas áreas de probabilidade e estatística, é o de Lewis (1977). É bastante claro e profundo em todos os conceitos e definições abordados com relação à confiabilidade. A abordagem prática dos conceitos é muito pouco abordada a não ser por exemplos e exercícios.

Leitch (1995) também apresenta um trabalho bastante didático, porém é uma das primeiras referências internacionais a abordar a confiabilidade em instalações industriais e em projetos já em um cenário mais recente, da década de 90. O trabalho apresenta uma profunda orientação teórica e muito interessante no que se refere à definição, representação e análise de sistemas complexos. O livro começa com apresentações básicas tanto de estatística, quanto de métodos e definições de conceitos de confiabilidade, porém ao longo do trabalho se aprofunda até abordar conceitos de estatística avançada. Vale ressaltar a forma didática como apresenta o modelo de Duane de crescimento de confiabilidade.

Segundo Sundararajan (1991), as ferramentas podem ser separadas em grandes categorias: as ferramentas indutivas e as ferramentas dedutivas ou ainda as ferramentas de análise quantitativa ou qualitativa. Entre as de análise qualitativa podem ser citadas, entre outras, FMEA (Análise de Modos e Efeitos de Falhas), discutida principalmente pelo próprio Sundararajan (1991), por Pillay et al. (2001) e por Modarres (1993), e o HAZOP ("Hazard and Operability"), apresentado em Sundararajan (1991) e Crawley; Malcolm; Tyler (1999). As técnicas de análise quantitativas, se baseiam por exemplo, em árvore de falhas, FMCA e RCM, e são bem apresentadas por Sundararajan (1991), Pillay et al. (2001), Modarres (1993), Moubray (1997), Nowlan; Heap (1978), Netherton (NETHERTON, 1999 apud SIQUEIRA, 2003), SAE (SAE JA1011, 1999 apud SIQUEIRA, 2003) e Lewis (1977).

Nas técnicas quantitativas uma das dificuldades é a obtenção de dados reais sobre taxas de falha. No caso específico da engenharia oceânica alguns dados sobre equipamentos podem ser encontrados em ORBDA (1992), que é um banco de dados sobre confiabilidade em sistemas offshore.

O trabalho de Sundararajan (1991) é completo em termos de discussão de ferramentas e apresentação de exemplos práticos de estudos de confiabilidade. O autor faz uma apresentação aprofundada sobre FMEA (Análise de Modos e Efeitos de Falhas).

Pillay et al. (2001) se aprofundam ainda mais nesta ferramenta propondo uma metodologia adaptada do FMEA. Para classificar os riscos, utilizam raciocínio aproximado "fuzzy" integrado com julgamento de experiência.

O livro de Modarres (1993) é uma apresentação mais prática de todos os aspectos de confiabilidade e de risco. Apesar de apresentar uma boa apresentação teórica e conceitual com boas bases de estatística e definições, o foco é garantir uma abordagem mais abrangente da confiabilidade. Como diz o próprio título, apresenta tudo o que um engenheiro deveria conhecer sobre confiabilidade. Este trabalho demonstra formas simplificadas e claras de correlação entre os métodos básicos mais conhecidos, como árvore de falhas, FMEA e FMCA e a aplicação de conceitos de probabilidade e estatística buscando a quantificação da confiabilidade. O trabalho apresenta abordagens interessantes de fatores humanos em confiabilidade e incerteza.

No caso do HAZOP, o guia de Crawley; Malcolm; Tyler (1999) foi escrito com o objetivo de ser um agrupamento de todas as boas práticas e experiências obtidas com a aplicação desta ferramenta ao longo de trinta anos.

Foram utilizadas diversas referências para descrever a abordagem da confiabilidade na área de manutenção. As apostilas do curso de Gerenciamento de Manutenção da FEI como de Siqueira (2003), Gambirasio (2003) e Carvalho (2003) são um grupo de referências completas com ênfase em diversos aspectos da importância da confiabilidade na manutenção. A apostila do prof. Carvalho (2003), diretor da Daimler Chrysler do Brasil, apresenta diversos dados sobre manutenção, tendências e planejamento estratégico da manutenção no mundo. O professor Luigi Gambirasio Júnior (GAMBIRASIO, 2003) apresenta, em suas apostilas, os conceitos para diversos indicadores de manutenção, definindo assim os índices de manutenção, de controle, de equipamento, de custos, de recursos humanos e outros mais usuais atualmente nas grandes empresas no país para gerenciamento da manutenção. Uma das apostilas apresenta também um resumo do "Documento Nacional", relatório de

pesquisa de âmbito nacional realizada pela Abraman (Associação Brasileira de

Manutenção).

Algumas referências foram estudadas por tratarem mais especificamente de RCM (Manutenção Centrada em Confiabilidade). Os trabalhos de Moubay (1997), Nowlan; Heap (1978), Netherton (NETHERTON, 1999 apud SIQUEIRA, 2003) e da SAE (SAE JA1011, 1999 apud SIQUEIRA, 2003), são as bases desta ferramenta e de sua divulgação mundial, além da apostila de Siqueira (2003) como referência nacional. Nowlan; Heap (1978) apresentam ao mundo através de seu livro o RCM. Os autores, engenheiros da United Airlines, desenvolveram o conceito de RCM. Mais tarde, este foi utilizado como base para elaboração do conceito adotado pela SAE. No Brasil, a abordagem da confiabilidade na manutenção foi lançada com o livro de Moubay (1997). O trabalho trouxe para o segmento industrial operacional, e principalmente para a manutenção, o conceito de confiabilidade e mais especificamente as técnicas apresentadas pela SAE definindo a manutenção centrada em confiabilidade. A partir deste trabalho, Moubay lançou um segundo estudo, chamado de RCM2, utilizado como base para a definição dos critérios de RCM ("Reliability Centred Maintenance") da SAE (Sociedade Internacional de Engenheiros Automotivos). Nos últimos anos, o RCM na forma como é apresentado por Moubay tem sido tema de inúmeros congressos, cursos e se tornou referência obrigatória no planejamento estratégico da manutenção industrial. O artigo de Netherton (NETHERTON, 1999 apud SIQUEIRA, 2003), presidente do sub-comitê de RCM da SAE, faz uma apresentação histórica do RCM, com os conceitos que levaram ao seu desenvolvimento e as motivações que levaram a SAE a gerar um padrão para definição de processos de RCM. O padrão SAE JA1011 (1999 apud SIQUEIRA, 2003) descreve os critérios mínimos que qualquer processo deve atender para que possa ser chamado de "RCM". A apostila do professor Kleber T. Siqueira (SIQUEIRA, 2003) apresenta uma introdução ao RCM. O professor Kleber T. Aladon é a empresa criada por John Moubay para divulgação do RCM mundialmente. Assim, a apostila é baseada em material da SQL System e Aladon que apresentam as diferentes gerações do RCM, os conceitos básicos do RCM2 e

seus benefícios. Esta apostila apresenta igualmente a metodologia de implantação de RCM apresentada por Moubrey, o RCM2.

Com grande profundidade em aspectos de segurança e definições de conceitos, o trabalho de Leonam dos Santos Guimarães (GUIMARÃES, 2003) é uma das publicações editoriais mais recentes nesta área. Por ser um trabalho atual, apresenta os mais modernos métodos de análise e avaliação de segurança de sistemas, sendo que estes podem muitas vezes ser utilizados de maneira mais ampla no conceito de confiabilidade, abordando aspectos de disponibilidade, custos de operação, etc.

A importância da formação dos profissionais de unidades de produção é enfatizada nos trabalhos de Wolfram; Owen (1991) e Kuo (2001). Para reforçar a ideia da necessidade de formação específica em confiabilidade, o trabalho dos professores Julian Wolfram e D. Gareth Owen (WOLFRAN; OWEN, 1991) se baseia nas conclusões do relatório Cullen (Relatório da investigação pública do desastre da plataforma Piper Alpha, de 1990) ressaltando os aspectos educacionais levantados no relatório. O trabalho faz um levantamento das realidades e das necessidades de formação de engenheiros e operadores de unidades offshore. Ele fornece recomendações e reafirma a importância de uma formação básica fundamental na área de confiabilidade. O trabalho de Chengji Kuo (KUO, 2001) introduz a noção de ALARP (“As Low As Reasonably Practicable”) de que após a divulgação do relatório Cullen, apareceu a necessidade de transferir a responsabilidade de análise do risco para o operador, sendo portanto, necessária a introdução do conceito de que o operador deveria manter o risco tão baixo quanto fosse razoável praticar. Este trabalho apresenta uma discussão interessante sobre os erros cometidos acerca dos conceitos de risco, perigo e gestão de riscos.

Zilda de Castro Silveira e Kátia Luchesi Cavale, da UNICAMP, propõem (SILVEIRA; CAVALE, 2001) uma metodologia para identificação de fontes de incertezas assim como dos parâmetros que mais influenciam a confiabilidade global de um sistema ainda na fase de projeto. O estudo se desenvolve através da apresentação de um modelo numérico baseado em um modelo de sistema massa-mola, estendido em seguida para um sistema composto de um eixo com massa

centralizada apoiado em dois mancais hidrodinâmicos. Os resultados numéricos são então confrontados com resultados de uma série de ensaios.

Baseou-se em dois trabalhos para discutir a aplicação dos conceitos de confiabilidade na área naval e oceânica. Ove Tobias Gudmestad (GUDMESTAD, 2001) discute o uso e a filosofia de diversas ferramentas de gestão de riscos, tanto de análise qualitativa quanto quantitativa. O trabalho é direcionado para a fase de projetos de estruturas offshore e operações marítimas e fornece recomendações acerca do uso correto das ferramentas. Já Kawano; Morishita; Mônaco (2000) apresentam um procedimento para cálculo de disponibilidade em sistemas complexos, aplicado mais especificamente para um sistema de posicionamento dinâmico.

Vários trabalhos foram utilizados como referências de aplicações de técnicas e estudos em engenharia naval e oceânica ou como fonte de dados, descrevendo sistemáticas para levantamento e armazenamento de dados. Oliveira et al. (1991) apresentam um exemplo de aplicação de um estudo completo de confiabilidade no projeto de um sistema de Manifold para operação em águas profundas. O trabalho apresenta as considerações, objetivos e metodologia utilizados assim como os resultados alcançados após o término do estudo. O trabalho de Sverre Haver, Kjell Larsen e Trond Stokka Meling (HAVER; LARSEN; MELING, 2001) traz um exemplo de aplicação de estudo de confiabilidade para um sistema de amarração de 12 linhas de uma plataforma semi-submersível. De Leon; Heredia-Zavoni (2001) apresentam em seu trabalho um resumo de uma série de dados e distribuições probabilísticas de danos mecânicos em plataformas marítimas de perfuração baseada em dados de relatórios de inspeção de plataformas da baía de Campeche (México). Melchers (2001) apresenta modelos probabilísticos de corrosão para estudos de confiabilidade, principalmente em aplicações marítimas. O trabalho propõe um modelo principal e discute fatores que afetam seus resultados, como diferentes agentes ambientais. O trabalho de Rajagopalan (2001) propõe uma metodologia para estudo de confiabilidade da estrutura de um casco de navio. O estudo analisa falhas causadas por deformações plásticas de momento e considera as variáveis com comportamento fuzzy. O trabalho sugere que o uso de variáveis "fuzzy", ao invés de variáveis aleatórias, elevou a probabilidade de falhas

industriais, unidades de produção ou veículos. análise de riscos em termos de continuidade operacional e desempenho das plantas estudo de confiabilidade, este trabalho é voltado para a busca da confiabilidade e manutenção. Apesar de ser quase impossível dissociar estes focos durante qualquer segurança de processos, pessoas e instalações, e continuidade operacional, ou A confiabilidade é estudada hoje em duas áreas bem distintas:

no mercado a partir dos conhecimentos fundamentais apresentados neste trabalho. estudo realizado de maneira sistemática e adaptado de diferentes técnicas disponíveis eficiência operacional em uma indústria petroquímica. O exemplo apresentará o exemplo prático de realização de um estudo realizado com ênfase em busca de direção à confiabilidade e ao gerenciamento de riscos. Também será apresentado um os benefícios que podem ser obtidos através da correção do foco da engenharia em apresentados diversos aspectos da indústria envolvidos com confiabilidade e riscos e conhecimentos em busca de confiabilidade e gestão de riscos. Deverão ser principais características e como estas podem ser utilizadas como uma base de ferramentas e conhecimentos surgidos nos últimos anos, tentar identificar suas O objetivo deste trabalho é apresentar as diversas técnicas,

### 1.3 - OBJETIVOS

destas unidades sobre as unidades, buscando estabelecer margens de segurança no projeto e operação unidades móveis de perfuração. O estudo analisa diferentes efeitos dos esforços estatísticos para aplicação de técnicas de confiabilidade para operação e projeto de recomendações a este respeito. O trabalho de Morandi (2001) discute métodos discutem aspectos sobre criticidade e consequências das falhas e emitem variações de performance do conjunto ao longo do tempo. Os autores também estudo leva em consideração as políticas de inspeção e manutenção e discute as dados relativos à performance de "blowout preventers" para águas profundas. O Clark (JORGE; WOLFRAM; CLARK, 2001) apresentam análises de um conjunto de em cerca de uma ordem de magnitude. Nilo de Moura Jorge, Julian Wolfram e Phillip

O primeiro capítulo discute de forma bem abrangente as definições e conceitos necessários para compreensão das diversas formas na qual a confiabilidade e o risco se apresentam na indústria. Em uma primeira parte são apresentadas as definições básicas de confiabilidade, dos principais parâmetros que a caracterizam e a noção de quantificação do risco. Também é discutida a forma como estes parâmetros se correlacionam entre si e com a própria grandeza que pode representar a confiabilidade ou o risco. Nesta parte são definidos alguns parâmetros usuais na indústria e que foram utilizados ao longo deste trabalho. Em seguida é apresentada a forma como a análise de confiabilidade pode ser estendida para sistemas complexos. Neste item são relacionados os conceitos de sistemas em série, sistemas em paralelo e sistemas mistos, qual a importância de seu entendimento em sistemas complexos e sua influência sobre as grandezas relacionadas à

apresentada com maior detalhe. aplicado em uma indústria de processo. A seguir, a estrutura do trabalho é também apresentado um exemplo prático de estudo de confiabilidade e riscos dos objetivos e dos resultados e seus benefícios na indústria e em projetos. Foi a aplicabilidade dos conceitos fundamentais, uma discussão sobre a quantificação. Em seguida, foram apresentadas as técnicas existentes no mercado, para sua manipulação e quantificação. O trabalho foi desenvolvido de forma a apresentar inicialmente os conceitos fundamentais de confiabilidade e risco e as teorias necessárias e aplicáveis

## 1.4 - ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho busca sugerir e contribuir para que os engenheiros adquiram definitivamente uma nova forma de pensar e agir, não mais se baseando exclusivamente em técnicas, mas em todos os conceitos aplicáveis em confiabilidade e em gestão de riscos. Pretende-se sugerir que a confiabilidade pode e deve ser abordada com uma abrangência muito mais ampla do que seu uso restrito a ferramentas disponíveis no mercado, visando sempre os objetivos da empresa ou do negócio.



confiabilidade. A terceira parte deste capítulo apresenta o conceito de padrão de falha, descrevendo um pouco o histórico de sua aparição e evolução. São relacionadas as diferentes famílias de padrões de falha identificáveis na indústria. É também citado um exemplo ou aplicação de cada família em casos reais.

O capítulo 3 descreve de forma geral as principais ferramentas de análise sistemática de confiabilidade encontradas atualmente no mercado nacional. Comenta-se as ferramentas e discute-se a aplicabilidade de cada uma delas em casos reais.

Uma discussão sobre os diferentes usos e a importância do estudo de confiabilidade na operação diária e em projetos de unidades industriais e de produção é realizada no capítulo 4. Este capítulo apresenta separadamente os aspectos de confiabilidade, sua importância e seu controle na área de manutenção, nas áreas envolvidas com a operação e em projetos. É efetuada uma discussão aprofundada sobre a importância da disseminação de noções de confiabilidade e risco em diversos níveis dentro de uma unidade de produção. Também é realizada uma apresentação sobre a abrangência e importância da aplicação dos conhecimentos a respeito de confiabilidade ainda durante as diferentes etapas do projeto de instalações ou unidades industriais. No caso de projetos, separa-se a análise da fase conceitual do projeto com a fase de implantação em testes. Estas fases são muito distintas em termos de análise de confiabilidade e apresentam abordagens pouco semelhantes.

O capítulo 5 é dedicado à apresentação de um exemplo prático de estudo de confiabilidade e análise de riscos. Mesmo sem relacionar todas as considerações e dados e até mesmo quantificar os resultados, este exemplo é bastante ilustrativo de uma análise com forte base nos aspectos teóricos e conceituais de confiabilidade. O exemplo revê e reafirma diversos conceitos teóricos e definições como base para a sequência da análise qualitativa e quantitativa dos parâmetros de confiabilidade e riscos. Também é demonstrada a forma como ações de confiabilidade, de curto, médio ou longo prazo, podem interferir no ganho ou na perda de confiabilidade, ou no aumento ou diminuição dos riscos em uma unidade de produção.

O último capítulo foi reservado para a discussão e considerações finais sobre o trabalho e a evolução da aplicação da confiabilidade e da análise de

riscos hoje e no futuro próximo. Neste capítulo abre-se também uma discussão sobre a importância da formação em diversos níveis, porém principalmente na graduação, a respeito dos diferentes conceitos citados neste trabalho, visando um maior amadurecimento do setor industrial nacional ao redor do reconhecimento e melhoria da confiabilidade em seus processos, instalações e operações.

Este conceito é fundamental neste trabalho, pois se desejamos promover uma conscientização dos aspectos de confiabilidade na engenharia, desde o projeto até o dia-a-dia de operação do sistema, é fundamental que se conheça e estabeleça desde o projeto inicial de qualquer instalação, veículo ou equipamento, qual ou quais são as funções esperadas que este deve desempenhar. Este é o primeiro conceito fundamental que deve estar sempre na mente do engenheiro. A identificação das funções e o papel de cada componente de um sistema em relação ao cumprimento das funções parecem óbvios. Porém, é comum analisar instalações e constatar componentes (ou até lógicas de segurança) sem função clara ou mesmo funções do sistema que não são atendidas. Este tipo de componente aparece de forma indesejada quando ocorrem falhas de projeto, mas também, propositadamente ou

esperada.

claro, que a falha não pode ser constatada sem antes se estabelecer a função houver qualquer incidente ameaçando a segurança ou o meio ambiente. Portanto, fica para o meio ambiente e os funcionários. Neste caso, o sistema também falhará se dizendo que sua função é de produzir pelo menos 10.000 barris / dia com segurança menos 10.000 barris / dia, esta falhará se produzir menos. Podemos continuar ainda deixar de produzir. Por outro lado, se dissermos que sua função é de produzir pelo a função de uma plataforma de exploração é de produzir petróleo, esta falhará se de falhas ou discutir diferenças de falha, defeito ou pane. Portanto, se definirmos que desempenhar sua função. Para este trabalho não há interesse em se distinguir os tipos dado conjunto de condições. Desta forma, a falha ocorre quando um sistema deixa de desempenhar sua função por um período de tempo especificado, de acordo com um é a probabilidade de que um componente, dispositivo, equipamento ou sistema vai confiabilidade, associando-a com a noção de probabilidade. Para ele a confiabilidade utilizada é aquela dada por Lewis que busca uma definição quantitativa da

De maneira mais genérica, a definição de confiabilidade mais

## 2.1 - DEFINIÇÕES

# QUANTIFICAÇÃO DO RISCO

## 2 - TEORIA DA CONFIABILIDADE E

$$P\{X\} = \frac{N_x}{N}$$

(1)

evento  $X$  é dada por:

A interpretação clássica se baseia no conceito de resultados com mesma chance. Por exemplo, ao se jogar uma moeda, há dois resultados possíveis; cara ou coroa. Se considerarmos que os dois resultados tem a mesma chance de ocorrer e que a soma das probabilidades deve ser 1 então a probabilidade de cada um deve ser 1/2. Assim, de acordo com esta definição, a probabilidade  $P\{X\}$  de um

### Interpretação clássica

A definição de confiabilidade, acima, também cita o conceito de probabilidade. Desta forma, é conveniente apresentar e discutir as diferentes interpretações para este conceito para esclarecer a definição utilizada neste trabalho. Entre diferentes autores, como Papoulis (1984) e DeGroot (1984), fica possível distinguir três, e até quatro, interpretações distintas para o conceito de probabilidade, desde que surgiram os primeiros estudos sobre este tema ao redor do século 16. sistema.

De acordo com Guimarães (2003), outras características importantes para analisar a confiabilidade de um sistema, além das funções, são a estrutura, as condições de funcionamento, condições de operação e o ambiente do potenciais de vazamento.

De acordo com Guimarães (2003), outras características importantes para analisar a confiabilidade de um sistema, além das funções, são a estrutura, as condições de funcionamento, condições de operação e o ambiente do potenciais de vazamento. desejadas pelo usuário, podem provocar uma falha da unidade por serem fontes usuário. Estes componentes, apesar de não terem nenhum papel nas funções número muito maior de flanges, picagens e válvulas do que o necessário para o configuração de montagem e operação. Em geral estes sistemas acabam tendo um de refrigeração ou compressão de gases que prevêem diversas possibilidades de funções desnecessárias para seu usuário final. Um exemplo claro disto são sistemas projetados para atender uma diferente gama de funções e podem ter componentes ou adaptados ou modificados conforme encomenda. Estes equipamentos são, portanto, equipamentos ou peças é atualmente baseada em modelos padronizados que são não, em modificações de instalações e desmontagens. A fabricação da maioria dos

## Interpretação subjetiva

Esta equação foi utilizada por Von Mises no início do século passado como uma evolução da definição clássica. Esta definição é prática, pois utiliza, de forma implícita, a experiência adquirida em experimentos passados. Por outro lado, para experimentos reais, os números  $n_X$  e  $n$  podem até ser grandes, mas são finitos, e portanto, a razão entre estes não pode ser aproximada por um limite. Claramente, esta definição não pode ser utilizada para problemas em que o número de repetições ou de ocorrências é pequeno.

onde:  $n_X$  é o número de ocorrências de X  
 $n$  é o número de tentativas

$$P\{X\} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n_X}{n} \quad (2)$$

$P\{X\}$  de um evento X é o limite

Esta interpretação se baseia na definição de que a probabilidade

## Interpretação a partir da frequência relativa

Alguns problemas surgem desta interpretação. O conceito "resultados com mesma chance" equivale a dizer "resultados com probabilidades iguais" e portanto, se baseia no conceito que está se buscando definir. Esta interpretação também não permite avaliar problemas em que os resultados não tenham chances iguais. Em alguns casos, em que se analisam resultados baseados em dados históricos, seria necessário aguardar a ocorrência de um grande número de resultados favoráveis e portanto um grande número de resultados para assumir que os resultados têm chances iguais. Caso o número de resultados possíveis seja infinito, é necessário utilizar alguma medida de infinito como comprimento ou área (PAPULIS, 1984).

onde:  $N_X$  é o número de resultados favoráveis ao evento X  
 $N$  é o número de resultados possíveis

onde: -  $t$  é o período desejado até que ocorra a falha  
-  $t'$  é o período real em que a falha ocorre.

Assim:  
Para Lewis, a confiabilidade pode ser sinteticamente definida como a probabilidade de um sistema sobreviver por um período de tempo específico.

baseará.  
Esta última definição, a mais recente dentre as apresentadas aqui, evita ambiguidades conceituais e será a definição sobre a qual este trabalho se

3. Se os eventos  $X$  e  $Y$  forem mutuamente exclusivos, então:

$$P\{X \cup Y\} = P\{X\} + P\{Y\} \quad (5)$$

2. A probabilidade do evento certo  $C$  é igual a 1

$$P\{C\} = 1 \quad (4)$$

1. A probabilidade  $P\{X\}$  de um evento  $X$  é um número positivo, menor ou igual a 1, associado a este evento:

$$0 \leq P\{X\} \leq 1 \quad (3)$$

exclusivamente nos três postulados a seguir:

A definição axiomática de probabilidade, apresentada por Kolmogoroff em 1933 (KOLMOGOROFF, 1933 apud PAPOULIS, 1984), é baseada

### Definição axiomática

DeGroot (1984) sugere uma interpretação subjetiva de probabilidade, já citada por diversos autores desde o século 19. Esta interpretação se baseia em julgamento da pessoa que determina a probabilidade  $e$ , portanto, deve-se considerar a probabilidade subjetiva diferente da probabilidade real. O julgamento dá quando uma pessoa, baseada em experiência e bom senso, estima a probabilidade de que um resultado irá ocorrer.

-  $R(t)$  é a confiabilidade até  $t$ .

Ora, para este estudo, busca-se uma abordagem mais ampla e flexível permitindo que os resultados de um estudo de confiabilidade possam ser medidos de acordo com os objetivos de cada análise. Assim, ao longo deste trabalho, buscar-se-á também analisar, por exemplo, a probabilidade que o custo de manutenção e de perdas por paradas do sistema seja menor do que um dado valor por um período de tempo dado, da forma:

$$P\{X' < X, t\} = 1 - P\{X' > X, t\} \quad (7)$$

onde:  
 -  $X$  Custo de manutenção e perdas de referência em um dado período  $t$   
 -  $X'$  Custo real de manutenção e perdas em um dado período  $t$

Desta forma, sugere-se que a noção de confiabilidade pode ser interpretada de maneira quantitativa como uma probabilidade. Porém, ao invés da proposta de Lewis, a mais aceita pela maioria dos autores atuais, que sugere exclusivamente uma correlação direta com a falha, sugere-se que esta correlação possa ser definida de acordo com o objetivo de cada estudo, isto é, o que se pretende medir. Na prática, esta correlação pode ser feita conforme a definição de Lewis, analisando a ocorrência de falhas, ou de outra forma, analisando os efeitos das falhas. Este outro tipo de análise pode ser chamado de análise de riscos.

O conceito de risco é dado por Guimarães (2003), como sendo baseado nas consequências de um evento indesejável e nas possibilidades de ocorrência destas consequências. Assim, o risco pode ser considerado como uma grandeza que avalia a ocorrência das consequências de uma falha em termos de amplitude e probabilidade. De forma mais prática, Modarres (1993) define a análise de risco como sendo o potencial de perda ou ferimento resultante da exposição a um evento  $e$ , de forma quantitativa, é fundamentalmente o resultado da medida da probabilidade de ocorrência de um evento não desejado associado à amplitude de suas consequências. Fica claro que o evento não desejado é o evento que caracteriza o objetivo da análise de risco, isto é pode ser desde o evento fundamental, como também o evento consequência de outros eventos anteriores. Desta forma, enquanto a

confiabilidade depende diretamente do tempo, o conceito de risco permite uma análise mais abrangente.

Um exemplo é o caso do trabalho de Oliveira et al. (1991) a respeito do Manifold OCTOS-1000 da Petrobrás. Os autores estudaram a confiabilidade do sistema usando como atributo a ser avaliado a indisponibilidade de produção do sistema como um todo, como resultado das falhas de seus componentes.

Será visto mais adiante, no exemplo prático, que alguns riscos são considerados intoleráveis. Estes riscos são em geral aqueles cujas consequências são tão graves, e em alguns casos nem podem ser dimensionadas, que a probabilidade de sua ocorrência deixa de ser importante. Por menor que seja a probabilidade de ocorrência, deve-se tomar alguma ação para impedir o evento. Este tipo de risco está em geral relacionado à continuidade do negócio. Em uma indústria, um acidente com impacto ambiental, com consequências graves à saúde de seus funcionários ou da comunidade próxima é um exemplo de evento que pode comprometer a continuidade do negócio e portanto pode ser considerado um risco inaceitável.

Em outros casos, o risco pode ser tão pequeno a ponto de não ser necessário considerá-lo em uma análise. Pode-se então deduzir que o estudo de confiabilidade se aplica apenas a uma certa faixa de riscos situada entre os riscos pequenos aceitáveis e os riscos muito grandes ou então intoleráveis.

Para este trabalho, definiremos o conjunto de efeitos de uma falha como todas as manifestações que resultam de uma ou mais falhas. Alguns autores distinguem a definição de efeito e consequência, sendo que o efeito resulta de um único evento e as consequências, de maneira mais ampla, podem envolver mais eventos. Esta distinção não será feita neste trabalho.

Na prática, como será visto mais adiante no exemplo, em geral não se fala em efeito de falha, porém em efeito decorrente de um modo de falha. O conceito de modo de falha fica mais claro quando utilizamos um exemplo de análise de efeitos e modos de falha, ou FMEA. Em um sistema de posicionamento dinâmico para unidades flutuantes, uma das suas funções é de garantir que a unidade se mantenha sempre em uma dada área de operação. Para esta função, uma falha ocorre quando a unidade se desloca para fora da área de operação e para esta falha



encontram-se diversos modos de falhas, entre eles, falha de um propulsor, falha do sistema de controle, falha de instrumentos, etc. O modo de falha se distingue da causa de falha pelo nível de decomposição do sistema. Assim, o modo de falha de um componente de um sistema pode ser a causa de um modo de falha definido ao nível do sistema (GUMARÃES, 2003).

Durante o resto deste capítulo de discussão de conceitos, o trabalho considerará a análise da falha e não de seus efeitos e portanto o desenvolvimento será efetuado para  $R(t)$ , porém fica implícita a possibilidade, para qualquer caso, de análise do efeito das falhas, ou análise de riscos, como se verificará mais adiante no exemplo apresentado.

Para uma determinada função de densidade de probabilidade fica claro que a probabilidade de ocorrência de uma falha é dada por:

$$F(t) = \int_t^{\infty} f(t') dt' \quad (8)$$

onde:

- $f(t')$  é a função de densidade de probabilidade
- $F(t)$  é a probabilidade de falha em um período  $t$  e pode ser chamada de função de distribuição cumulativa.

As figuras 1 e 2 a seguir mostram a correlação entre uma função de densidade de probabilidade genérica  $f(x)$  e a função de distribuição cumulativa  $F(x)$ . A figura 2 deixa claro que:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1 \quad (9)$$

Assim, retornando ao estudo de ocorrência de uma falha, tem-se:

Figura 2 - Função de Distribuição Cumulativa

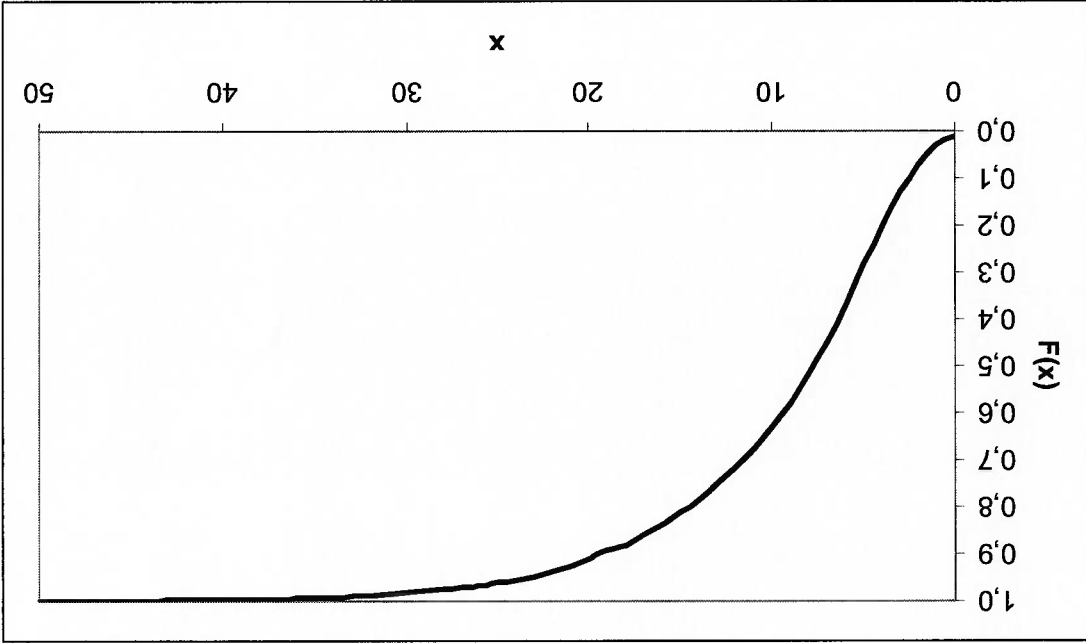
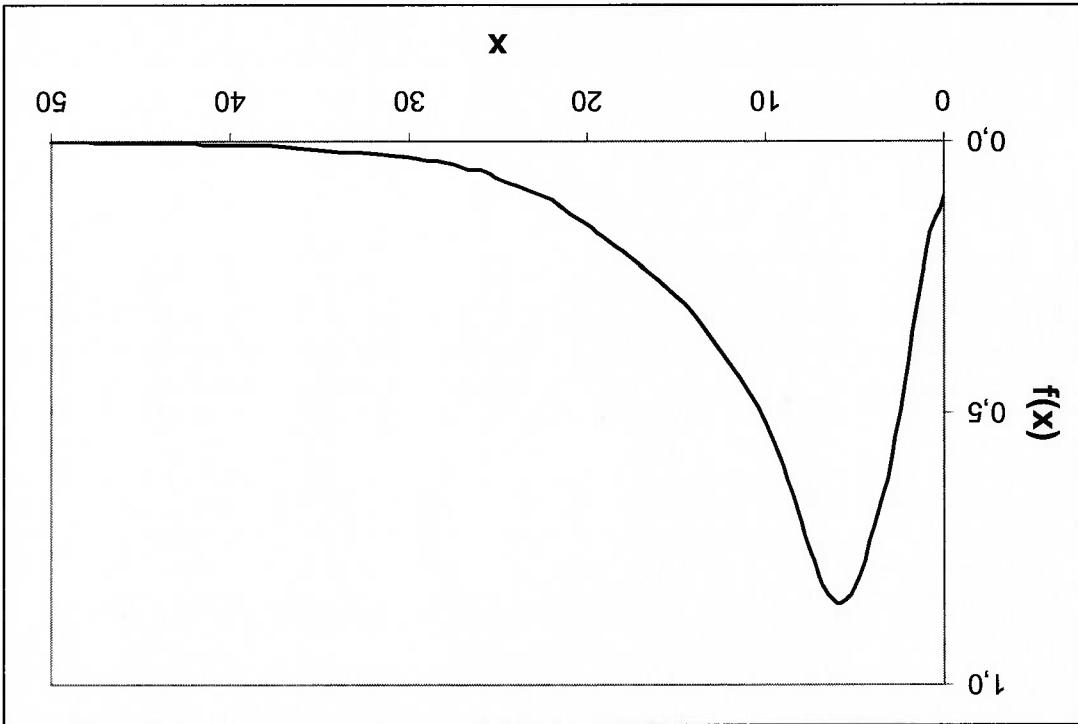


Figura 1 - Função de densidade de probabilidade



(16)

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t') dt'}$$

e que:

(15)

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

Assim, demonstra-se que:

A seguir, é interessante definir o conceito de taxa de falhas para se poder encontrar a correlação da confiabilidade  $R(t)$  com este conceito. Como será visto a seguir, a taxa de falhas é um conceito muito mais prático para estudos de casos reais. Assim, pode-se definir a taxa de falhas  $\lambda(t)$  como a função de densidade de probabilidade do tempo para a falha, de forma que  $\lambda(t) \Delta t$  seja a probabilidade que o sistema vai falhar em algum instante  $t' > t + \Delta t$  sem que tenha falhado antes de  $t$ .

(14)

$$f(t) = -\frac{d}{dt} R(t)$$

é dada por:

Pode-se ainda escrever que a função de densidade de probabilidade

(13)

$$R(\infty) = 0$$

e

(12)

$$R(0) = 1$$

Deduz-se assim que:

(11)

$$R(t) = \int_0^t f(t') dt'$$

ou:

(10)

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t') dt'$$

Substituindo a expressão acima na expressão de  $\lambda(t)$ , obtém-se e resolvendo para  $f(t)$  obtém-se a função de densidade de probabilidade para falhas, da

forma:

$$f(t) = \lambda(t) \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t') dt'} \quad (17)$$

Conforme será verificado mais adiante ao se discutir os padrões de falha, verifica-se que a taxa de falhas de um equipamento pode quase sempre ser aproximada por uma constante. Fazendo essa aproximação pode-se simplificar a expressão anterior de forma que:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad (18)$$

e:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (19)$$

Para os profissionais de manutenção o parâmetro de falhas mais usual baseado em histórico, é o tempo médio entre falhas ou MTBF. Este parâmetro será definido mais adiante, porém, pode-se adiantar que com a definição do MTBF, deduz-se a equação utilizada com mais frequência pelos engenheiros de manutenção em situações de análise de confiabilidade:

$$R(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}} \quad (20)$$

Os estudos de confiabilidade e de risco na manutenção se baseiam em algumas poucas grandezas fundamentais para a análise quantitativa e qualitativa de dados.

## 2.1.1 - Tempo Médio Para Falhar

O tempo médio para falhar, ou MTTF ("Mean Time To Failure"), representa o tempo esperado em que o sistema vai desempenhar suas funções até a ocorrência da primeira falha. Este é dado pela esperança de  $f(t)$ , da forma:

Fica claro que quando  $t_n = 0$ , então se tem na realidade um equipamento novo e fala-se então em esperança até a primeira falha, retornando portanto ao MTTF. Esta última equação só é válida considerando a taxa de falhas constante. Será visto mais adiante o modelo de Duane, que define a grandeza MTBF instantâneo, que se distingue da definição apresentada agora baseada em uma média.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (24)$$

ou ainda, associando as equações (19) e (20):

onde: -  $t_n$  é o instante da falha  $n$  e  $n > 0$

$$MTBF = \int_0^{t_n} (t - t_n) f^{(n)}(t) dt \quad (23)$$

tempo médio entre as falhas  $n$  e  $n+1$  da forma:

De acordo com as equações dadas anteriormente, pode-se definir o

$$MTBF = \frac{\text{Nº de ocorrências}}{\text{Horas Totais - Horas Paradas}} \quad (22)$$

prática, é calculado da seguinte forma:

O MTBF, ou tempo médio entre falhas ("Mean Time Between Failures"), é o período médio entre a ocorrência de cada duas falhas sucessivas. Na devemos considerar o conceito de confiabilidade entre duas falhas.

Vale ressaltar que todas as expressões acima foram efetuadas considerando um equipamento novo em  $t=0$ . Fica claro porém que em geral, após uma falha o equipamento pode ser realocado em condições de operação e portanto

## 2.1.2 - Tempo Médio Entre Falhas

$$MTTF = E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (21)$$

3.

Outro aspecto importante que faz parte do estudo de confiabilidade é a busca pela região ótima de confiabilidade. Como visto na introdução, não existe sentido na busca pela confiabilidade máxima. Esta idéia ficará mais clara no exemplo estudado mais adiante, porém pode-se adiantar que a busca pela confiabilidade implica em altos custos de investimento, manutenção preventiva ou operação que nem sempre trazem benefícios da mesma grandeza, conforme apresentado na figura

A disponibilidade se distingue da confiabilidade por ser uma medida estatística baseada no funcionamento ao longo do tempo e é, portanto, um retrato do passado. A confiabilidade por outro lado, é a probabilidade de equipamento não falhar durante um certo período de tempo. A confiabilidade é uma grandeza de expectativa e, portanto, é uma representação do futuro.

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\text{Horas Totais} - \text{Horas Indisponíveis}}{\text{Horas Totais}} \quad (26)$$

pode ser dada por:

Assim uma estimativa, adequada para um modelo não especificado, condições de utilização. tempo em que a instalação ou equipamento fica à disposição da operação em A disponibilidade de uma instalação ou sistema é o percentual de

### 2.1.4 - Disponibilidade

$$\text{MTBR} \leq \text{MTBF} \quad (25)$$

O tempo médio entre reparos ou intervenções, o MTBR ("Mean Time Between Repairs"), é equivalente ao MTBF porém leva em conta as manutenções preventivas, isto é, é o parâmetro de avaliação da política de manutenção. Assim, pode-se afirmar que sempre:

### 2.1.3 - Tempo Médio Entre Intervenções

Nesta figura, fica claro que pode-se classificar o sistema trabalhando em três regiões distintas:

- Região A: o sistema opera com confiabilidade alta, porém com elevados custos de manutenção (neste caso manutenção preventiva), operação e investimento.
- Região B: o sistema opera em uma região ótima em que o custo global de manutenção, operação, investimento e custos devido a falhas são os mais baixos.
- Região C: o sistema opera com baixa confiabilidade e, portanto, tem custos elevados devido a falhas.

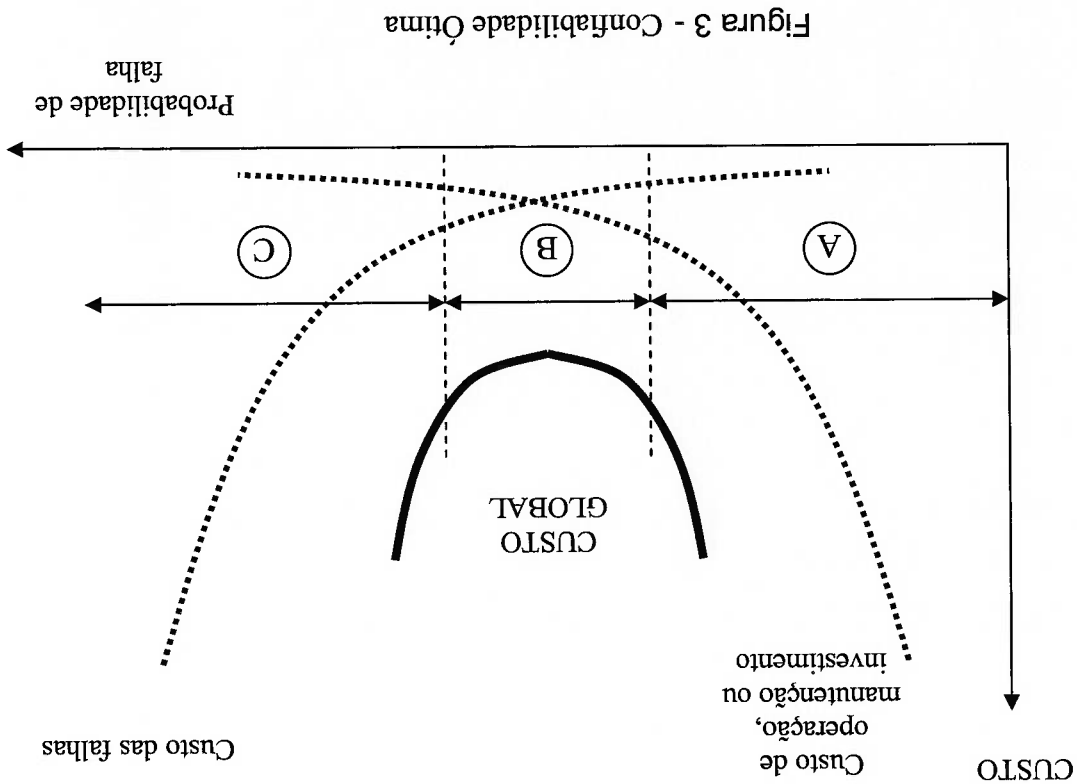


Figura 3 - Confiabilidade Ótima

Esta curva pode ser analisada de forma análoga ao se substituir a probabilidade de falha pelo conceito de risco, definido anteriormente. Neste caso surge a faixa de estudo citada mais acima em que a busca por riscos muito baixos é inviável e os riscos muito elevados passam a ser intoleráveis pelos custos representados pelas falhas.

É importante esclarecer que, ao se estudar um sistema complexo nem sempre se pode traduzir quantitativamente a confiabilidade como uma resultante direta da probabilidade de ocorrência de cada modo de falha. O número deixaria de

considerar um aspecto fundamental que chamamos anteriormente de risco intolerável. Uma falha ou modo de falha cujo risco é intolerável é aquele que gera um efeito inadmissível para a continuidade da operação do sistema. O risco intolerável é, em geral, dado por um efeito que possa vir a causar um impacto significativo no meio-ambiente, na segurança do processo ou das instalações ou ainda na segurança das pessoas. Não se pretende admitir que a probabilidade de ocorrência destes eventos deve ser nula, o que seria impossível, porém sempre que se deparar com a possibilidade de evento deste tipo, deve-se tomar alguma ação, seja para eliminar o modo de falha, ou mais frequentemente, para eliminar ou controlar seus efeitos. Por exemplo, a probabilidade de vazamento de um reservatório contendo um produto perigoso não pode nunca ser anulada, porém o efeito pode ser controlado com a construção de uma bacia de contenção. Sem a bacia de contenção, o vazamento é intolerável e com a bacia de contenção esta falha deixa de ser uma falha intolerável. Assim, uma falha pode deixar de ser intolerável se houver a possibilidade de ação de controle sobre seus efeitos.

Esta consideração é de fato tão importante que a insignificância da probabilidade diante da ocorrência foi traduzida de maneira irônica pelo capitão Murphy do exército dos EUA em uma lista de axiomas, sendo alguns deles (GUMARÃES, 2003):

- Tudo que pode ir mal irá mal;
- Se mais de uma coisa pode ir mal, aquela que irá mal será a que for mais catastrófica;
- Um atalho para executar uma operação perigosa é o caminho mais rápido que leva ao desastre;
- Toda tarefa que pode ser feita de uma maneira incorreta, não importando o quanto reduzida é a probabilidade, será um dia feita desta maneira;
- Toda peça suscetível de ter uma falha falhará no momento mais inoportuno e prejudicial;
- Não importa a dificuldade requerida para danificar um equipamento: será encontrado um meio de fazê-lo;
- Prever o pior é, em geral, o que há de melhor a fazer;



Segundo Modarres, a confiabilidade e a manutenibilidade são dois conceitos independentes ligados hierarquicamente com o conceito de desempenho. A confiabilidade e a manutenibilidade são os dois conceitos fundamentais a serem observados para se buscar a melhoria de performance. Assim, o trabalho não irá mais adiante no estudo da manutenibilidade.

$$MTTR = \frac{\text{Nº de ocorrências}}{\text{Horas Indisponíveis}} \quad (28)$$

Assim:

O tempo médio de reparo, ou MTTR é a grandeza que estabelece a rapidez com que se consegue restabelecer o funcionamento do equipamento e pode então ser calculado como a relação entre o tempo total de intervenções no equipamento ou sistema e o número de intervenções consideradas. Em alguns casos é interessante que o MTTR seja calculado baseando-se no tempo de reparo do equipamento ou peça mesmo que este tenha sido substituído, porém no caso deste trabalho, o MTTR foi considerado apenas para o tempo de intervenção no equipamento que o torna indisponível para o sistema.

onde: MTTR é definido a seguir.

$$M(t) = 1 - e^{-\frac{t}{MTTR}} \quad (27)$$

Vale esclarecer outro conceito importante, o da manutenibilidade, ou capacidade que um equipamento, sistema ou unidade tem de voltar a atender suas funções após a ocorrência de uma falha e pode ser escrita da forma:

• Nada pode ser feito à prova de burrice: os burros são extremamente engenhosos.

## 2.2 - SISTEMAS COMPLEXOS

Para qualquer análise quantitativa de probabilidade de falha ou de confiabilidade é necessário esclarecer o conceito de série ou paralelismo de falhas.

### 2.2.1 - Sistema em série

Este sistema é caracterizado pelo fato que se ocorrer uma falha em qualquer um de seus subsistemas ou componentes, este deixará de cumprir pelo menos uma de suas funções. Este sistema pode ser representado graficamente conforme a figura 4.

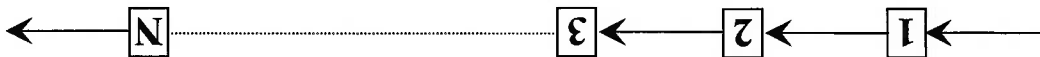


Figura 4 - Diagrama de Blocos de Sistema em Série

Assim, de maneira quantitativa, a confiabilidade do sistema e sua taxa de falhas são dados respectivamente por:

$$R_s(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_N(t) = \prod_{i=1}^N R_i(t) \quad (29)$$

e

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad (30)$$

### 2.2.2 - Sistema em paralelo

Para este caso, o sistema falha apenas se todos os subsistemas ou componentes falharem. Este sistema pode ser representado graficamente conforme a figura 5.

O conceito de padrão de falha, apesar de arriscado, é importante para a definição das considerações iniciais e o tipo de análise que deve ser adotada em função do tipo da instalação e do período de avaliação. O conceito é arriscado pois, ao contrário do termo utilizado, não existe padrão, propriamente dito, para qualquer falha, assim como não deve existir falha padrão. Os padrões de falha

### 2.3 - PADRÕES DA FALHA

Os sistemas complexos se comportam em geral como uma combinação dos modelos acima sendo portanto necessário, para correta quantificação da confiabilidade, a análise dos subsistemas e de suas interdependências. Isto será aprofundado mais adiante com as ferramentas de análise.

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - R_i(t)] \quad (32)$$

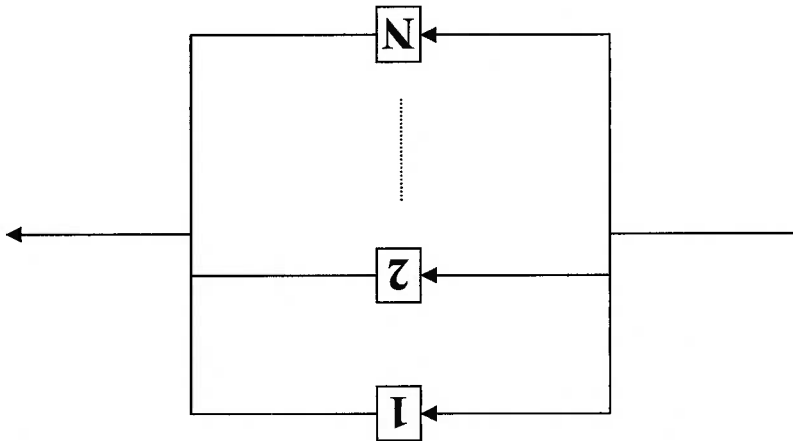
ou ainda

$$1 - R_s(t) = [1 - R_1(t)] \cdot [1 - R_2(t)] \cdot \dots \cdot [1 - R_N(t)] = \prod_{i=1}^N [1 - R_i(t)] \quad (31)$$

ser dada por:

Assim, de maneira quantitativa, a confiabilidade do sistema pode

Figura 5 - Diagrama de Blocos de Sistema em Série



ser considerados como fatores agravantes: “Mortalidade Infantil” e pode ser atribuído a 4 fatores principais que também podem decrescente. O fenômeno que descreve este comportamento é também conhecido por A região “A” caracteriza-se por uma taxa de falhas ou de risco distintas, conforme demonstrado na figura 6. Este primeiro padrão tem por característica três regiões bem falha.

A curva da banheira é muito adequada para explicar de forma generalizada o comportamento dos eventos em qualquer outro tipo de padrão de

### 2.3.1 - A tradicional curva da banheira

padrões distintos de falha que ocorrem na prática. materiais, desenvolvendo a concepção, hoje mais difundida, que identifica seis comportamento das falhas não é o mesmo para diversos tipos de equipamentos ou curva característica da banheira. Nas últimas décadas, cresceu o consenso de que o isto é, uma taxa de falhas mais elevada no início da vida útil, apresentando então a desenvolver o conceito de que era importante considerar uma “mortalidade infantil”, probabilidade de falhar. Entre a década de 50 e 70, uma segunda geração começou a falha de equipamento. Antes da década de 50, em uma primeira geração, a concepção de Ao longo dos tempos, identificam-se três gerações de concepção de está em reação à sua vida útil.

serem feitas em um estudo sobre a instalação, de acordo com a fase ou região em que forma, os padrões de falha servem de auxílio na decisão sobre as considerações a padrões de falha pretendem indicar em que situações surgem estas diferenças. Desta diferentes, também se comportam de forma muito diferente. As representações dos manutenção. Por outro lado, instalações quase idênticas, com tempos de diferentes tipos de instalações se comportam de forma muito distintas em termos de relacionado a falhas. No dia a dia da manutenção industrial é fácil constatar que de equipamentos ou instalações em relação à evolução da sua taxa de falhas ou risco apresentados aqui representam qualitativamente o comportamento de diversos tipos

- Controle de qualidade inadequado
- Métodos inadequados de manufatura
- Processo inadequado e erros humanos
- Instalação e partida inadequadas

A região "B", formada por uma taxa de falhas ou de risco constante, é o período de melhor rendimento do equipamento em termos de manutenção. Os fatores que causam falhas nesta região são:

- Erros humanos, excessos e falhas naturais
- Falhas inevitáveis
- Defeitos não detectáveis
- Baixos fatores de segurança

A região "C" é o fim da vida útil do equipamento ou do sistema, ou região de envelhecimento, e a ocorrência de falhas neste período pode ser agravada por:

- Manutenção inadequada
- Desgaste devido a atrito
- Corrosão
- Projeto do produto com vida útil curta

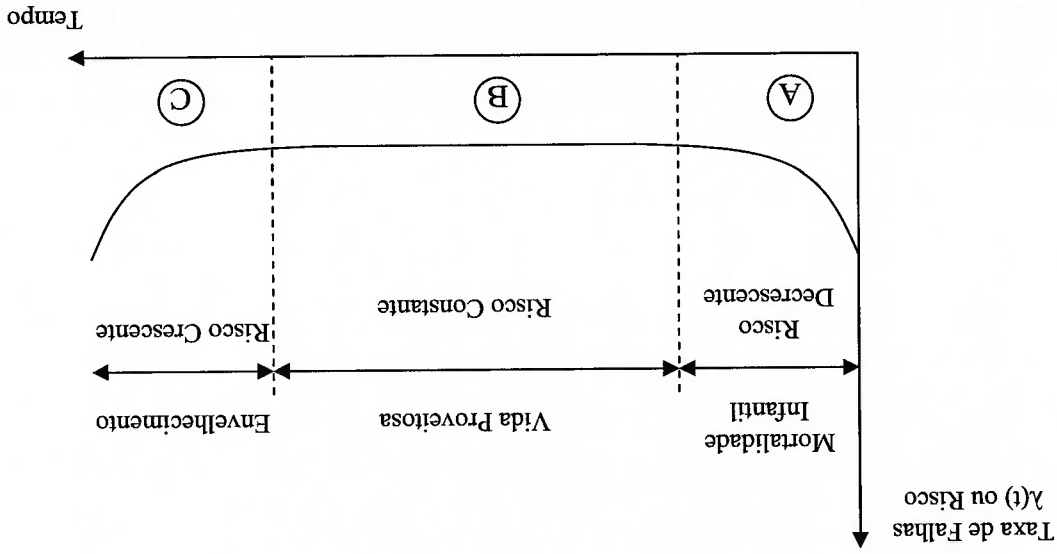


Figura 6 - Curva da banheira

A curva da banheira é uma representação simplificada de um sistema ideal. Ideal pois representa o sistema cuja gestão de produção e manutenção é a mais clara. A mortalidade infantil pode ser reduzida ou controlada através de melhoria da qualidade nos processos de fabricação dos equipamentos, de seus componentes ou até na montagem das instalações. O crescimento da taxa no final da vida útil pode ser gerenciado, através da manutenção, pelo alongamento da vida útil dos equipamentos ou de seus componentes com o auxílio da manutenção preventiva, ou ainda, com a reforma do equipamento. A taxa de falhas constante é uma aproximação de sistemas reais, já que estes apresentam fatores de desgaste que mudam ao longo do tempo e, portanto, fazem com que a taxa de falhas aumente muito ou pouco. Para sistemas muito complexos, estes efeitos são amortecidos ao longo do tempo e as variações na taxa de falhas ou são pontuais, ou são muito lentas. Isto explica por que, na maior parte do tempo, assume-se adequadamente que a taxa de falhas é constante durante períodos de tempo pequenos em relação à vida útil de todo um sistema ou instalação.

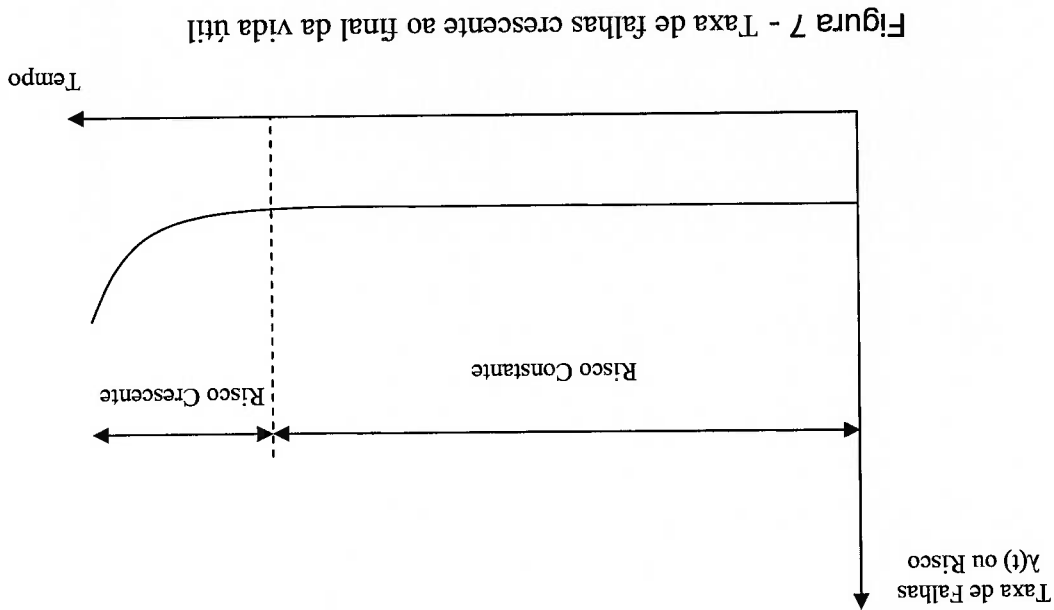
permitindo portanto caracterizar outro padrão de falha.

conforme será visto a seguir, a "mortalidade infantil" em veículos foi muito reduzida, plenamente. Só após este período, o carro era considerado confiável. Atualmente, por diversas vezes a concessionária antes que o veículo pudesse ser aproveitado "amaciar" o carro. Era muito freqüente o surgimento de defeitos e retorno do veículo cuidado nos primeiros dias e até semanas de uso, período este em que se dizia 80, um comprador de automóvel no Brasil, ao adquirir o veículo, tomava muito alguns anos, era bem representativa da indústria automobilística. Ainda na década de A curva da banheira costuma representar sistemas complexos e, até varia da mesma forma que a taxa de falhas.

de risco apresentada no capítulo anterior, pode-se assumir que o risco do sistema como a taxa de falhas e portanto a probabilidade de falhas varia, segundo a definição considerar que as consequências de uma falha pouco variam ao longo do tempo. Ora, conceito de risco. Fica claro que, para um dado equipamento ou sistema, pode-se Acrescentou-se nesta figura uma analogia da taxa de falhas com o

### 2.3.2 - Taxa de falhas crescente ao final da vida útil

Com a chegada ao Brasil, na abertura ocorrida no início dos anos 90, dos sistemas de gestão de qualidade e certificações internacionais para a indústria automobilística, e com o aumento da competitividade entre montadoras, os problemas de "mortalidade infantil" começaram a desaparecer e, hoje, praticamente não existem em automóveis. A fase de desgaste ou fim da vida útil do automóvel, por outro lado, passou a ser muito mais clara com o ganho de conhecimento em estudos de confiabilidade e de materiais em projetos da indústria automobilística. Ao final da vida útil do veículo, a taxa de falhas cresce abruptamente por causa de modos de falha predominantes que atuam desta forma. A figura 7 ilustra bem este comportamento.



Outro exemplo em que este padrão é nítido é em geladeiras, máquinas de lavar e outros eletrodomésticos.

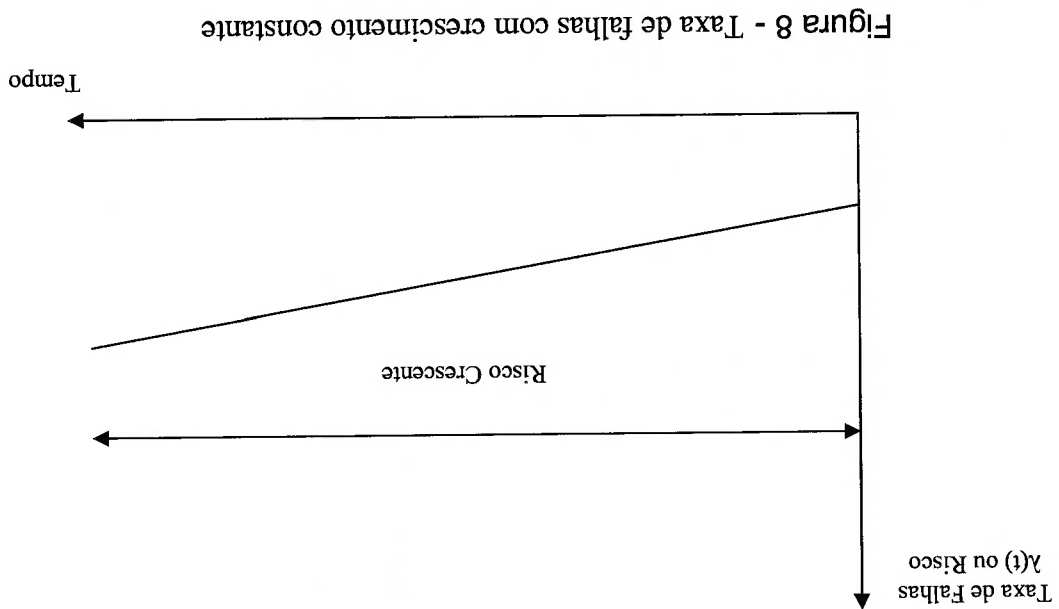
### 2.3.3 - Taxa de falhas com crescimento constante

Este padrão de falha costuma ocorrer em instalações onde existe a ocorrência de desgastes não-identificáveis ou inevitáveis. Em geral ao se constatar este tipo de padrão, a equipe de manutenção busca verificar o que causa o aumento

Este tipo de padrão pode ser observado hoje em rolamentos lubrificados com graxa. Um rolamento novo, instalado corretamente e em condições adequadas não tem possibilidade de falha no início do serviço, porém, após um certo período inicial começam a aparecer fatores aleatórios como sujeira, contaminações, etc., que trazem ao rolamento uma taxa de falhas também aleatória. Assume-se hoje que um rolamento com lubrificação adequada tem taxa de falhas constante.

### 2.3.4 - Baixa mortalidade infantil

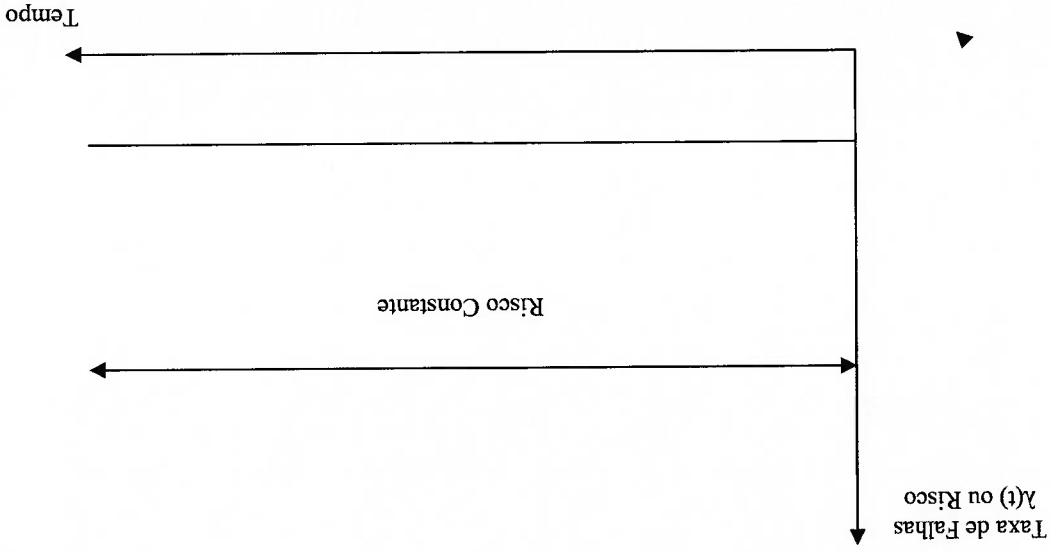
O edifício é um exemplo para este tipo de padrão, no qual as causas de desgaste não são todas identificáveis e solucionáveis. É possível verificar que em edifícios, atualmente, o fenômeno da "mortalidade infantil" tem se reduzido rapidamente. Por outro lado, a idade é um fator cada vez mais importante no aumento da taxa de falhas.



da ocorrência de falhas. Se a causa é identificada e pode ser solucionada então a instalação é recolocada em outro tipo de padrão de falha.



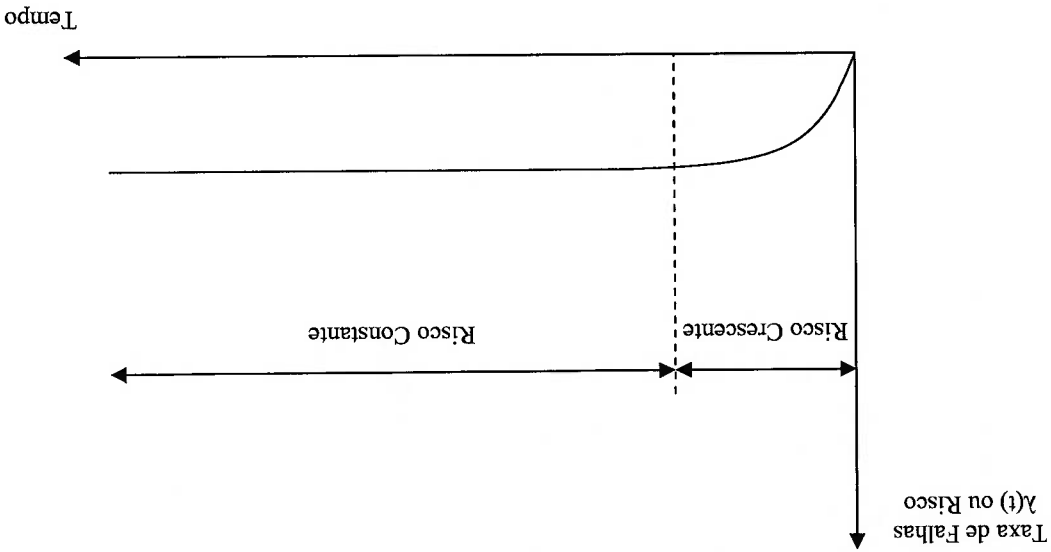
Figura 10 - Taxa de falhas constante



Este padrão também pode ser chamado de padrão aleatório já que não há nenhum efeito aparente ao longo do uso do equipamento. As falhas ocorrem de forma aleatória sem nenhuma tendência evidente de aumento ou redução de taxa de falhas. Este é o padrão típico de um equipamento com projeto adequado e com planos de manutenção preventiva e preditiva eficazes. A figura 10 ilustra graficamente este padrão de falha.

### 2.3.5 - Taxa de falhas constante

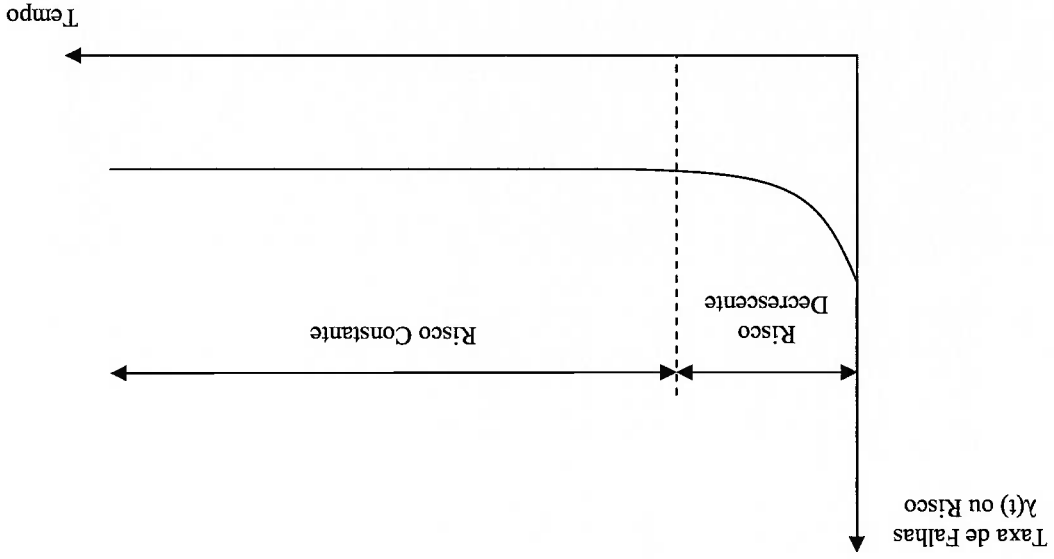
Figura 9 - Taxa de falhas com baixa mortalidade infantil



Naturalmente, os equipamentos e componentes reais não se comportam perfeitamente como nenhuma das curvas apresentadas anteriormente. Para se descrever o padrão de falha de qualquer equipamento real é necessário efetuar associações ou composições de padrões de falha descritos anteriormente. A

### 2.3.7 - Associações

Figura 11 - Alta mortalidade infantil



É fácil perceber que este é o padrão típico de equipamentos eletrônicos, para os quais não há desgaste, a ocorrência de falhas é totalmente aleatória exceto pela ocorrência de mortalidade infantil. Assim, este padrão tem se tornado cada dia mais importante junto com o aumento da eletrônica e automação nas indústrias. A figura 11 apresenta uma representação gráfica deste comportamento.

### 2.3.6 - Alta mortalidade infantil

Um exemplo muito claro deste tipo de comportamento é o vidro. Fica claro que o vidro não tem mortalidade infantil, seu desgaste é desprezível e, portanto, sua taxa de falhas é sempre constante.

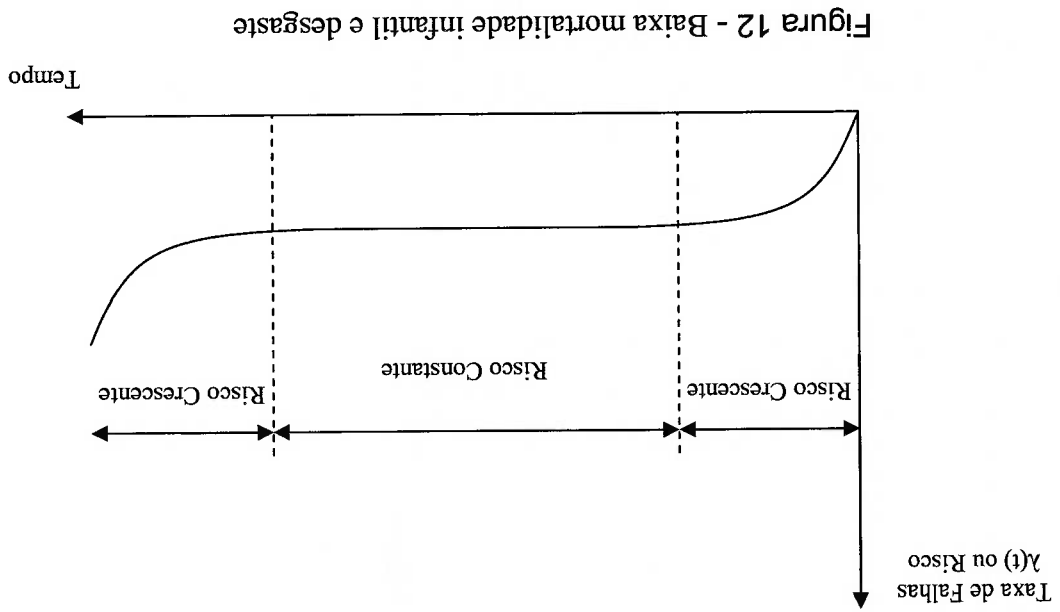


Figura 12 - Baixa mortalidade infantil e desgaste

figura 12 representa a composição dos padrões de falha representados pelas figuras 7 e 9.

O Hazop, de "Hazard and Operability" (Riscos e operabilidade) é uma ferramenta existente já desde os anos 60 e usada amplamente em indústrias

### 3.2 - HAZOP

As ferramentas de análise quantitativa são as ferramentas que buscam quantificar o estudo, estudando dados de probabilidade, criticidades e dependências entre eventos, de forma a obter resultados numéricos dos resultados do estudo. Este tipo de análise é, em geral, obtido a partir de ferramentas como a árvore de falhas, o FMECA ou o RCM, apresentados a seguir.

exemplos típicos deste tipo de análise. associados a um sistema. O Hazop e o FMEA, como serão vistos adiante, são calculam e nem buscam representar quantitativamente a confiabilidade ou os riscos dados de probabilidade de falhas ou dados estatísticos de erros ou falhas e não base de estudos mais completos. Este tipo de análise não requer o conhecimento de ferramentas de análise qualitativa são, em geral, utilizadas como quantitativas.

As ferramentas de análise podem ser classificadas em qualitativas e uma de uma grande família, com conceitos bem distintos. As técnicas a seguir são as principais utilizadas no mercado, cada melhores resultados.

As ferramentas de análise são importantes neste estudo para ilustrar a forma como diferentes tipos de abordagem podem ser estabelecidas para o estudo de confiabilidade ou a análise de riscos de uma unidade de produção. De forma alguma se sugere a busca pela ferramenta mais adequada e sua utilização indiscriminada. Não há, portanto, ferramenta melhor do que outra. Para cada tipo de análise e objetivo, deve-se efetuar uma análise preliminar criando-se as próprias sistemáticas ou adequando os benefícios das técnicas existentes para obtenção dos

### 3.1 - CONSIDERAÇÕES

## 3 - FERRAMENTAS DE ANÁLISE

químicas e petroquímicas. Esta ferramenta apesar de voltada para levantamento de riscos de segurança e ambientais, também é utilizada para avaliação de segurança de processos e portanto indiretamente avalia fatores causadores de indisponibilidade e danos e, assim, também é uma ferramenta de análise de falhas.

O Hazop se caracteriza por uma análise estruturada de um sistema, encaminhada por um grupo multidisciplinar. A equipe analisa linha por linha do processo, nos pontos onde ocorre qualquer alteração ou intersecção, chamados de "nós". Para cada nó, são analisadas as condições de operação esperadas e, para todas as variáveis possíveis, (temperatura, pressão, vazão, concentração, composição, etc.) analisam-se as consequências e as causas de alterações indesejadas (por exemplo, fluxo no sentido contrário, pressão baixa, etc.). Para cada nó e cada alteração, a equipe identifica os riscos existentes e sugere melhorias, ou alterações no processo ou na instalação, para eliminar ou reduzir os riscos. O estudo é todo baseado em experiência e julgamento.

Por sua característica de analisar sistematicamente as consequências de alterações de processo e identificar suas causas, estudando caso a caso cada ponto (ou nó) do processo e cada alteração possível, esta é uma técnica extremamente precisa já que, muito dificilmente, deixa passar algum evento não avaliado.

Esta ferramenta é aplicada largamente e recomendada mundialmente pelas maiores instituições e associações de indústrias químicas, além de estar presente como referência na legislação de muitos países no que se refere à segurança de instalações industriais.



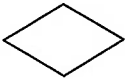

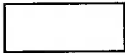





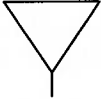

Apesar de ser uma ferramenta de análise qualitativa voltada quase exclusivamente para avaliação de riscos de segurança e ambientais, por todos os motivos acima, esta também pode ser uma técnica de referência interessante para análise de falhas e formação de consciência de confiabilidade.

A árvore de falhas é uma representação gráfica das interdependências dos modos de falhas dos subsistemas ou componentes de forma a facilitar a visualização e o equacionamento das probabilidades do sistema. Modarres (1993) estabeleceu a construção da árvore de falhas baseada em três classes de símbolos e uma classe intermediária.

### **3.3.1 - Árvore de falhas**

## **3.3 - ÁRVORE DE FALHAS OU SUCESSO**

Figura 13 - Símbolos para Construção de Árvores de Falhas

SÍMBOLOS DE EVENTOS PRIMÁRIOS	
EVENTO BÁSICO	
EVENTO CONDIÇÃO	
EVENTO NÃO DESENVOLVIDO	
EVENTO EXTERNO	
SÍMBOLOS DE EVENTOS INTERMEDIÁRIOS	
EVENTO INTERMEDIÁRIO	
SÍMBOLOS DE LIGAÇÕES LÓGICAS	
E	
OU	
E PRIORITÁRIO	
OU EXCLUSIVO	
INIBIDOR	
SÍMBOLOS DE TRANSFERÊNCIA	
TRANSFERÊNCIA PARA DENTRO	
TRANSFERÊNCIA PARA FORA	

seja o sistema teórico abaixo:

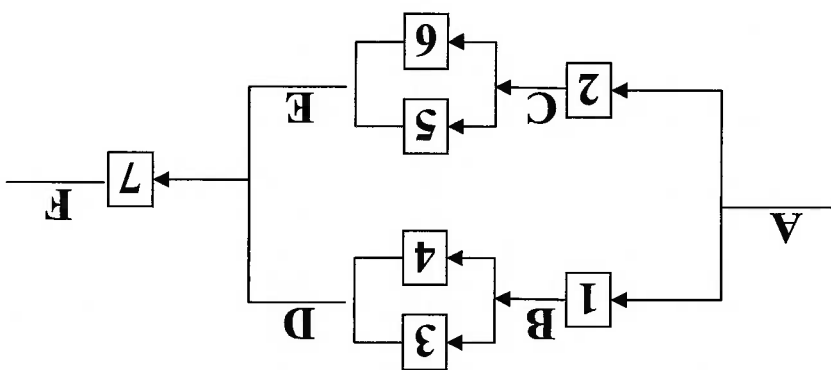


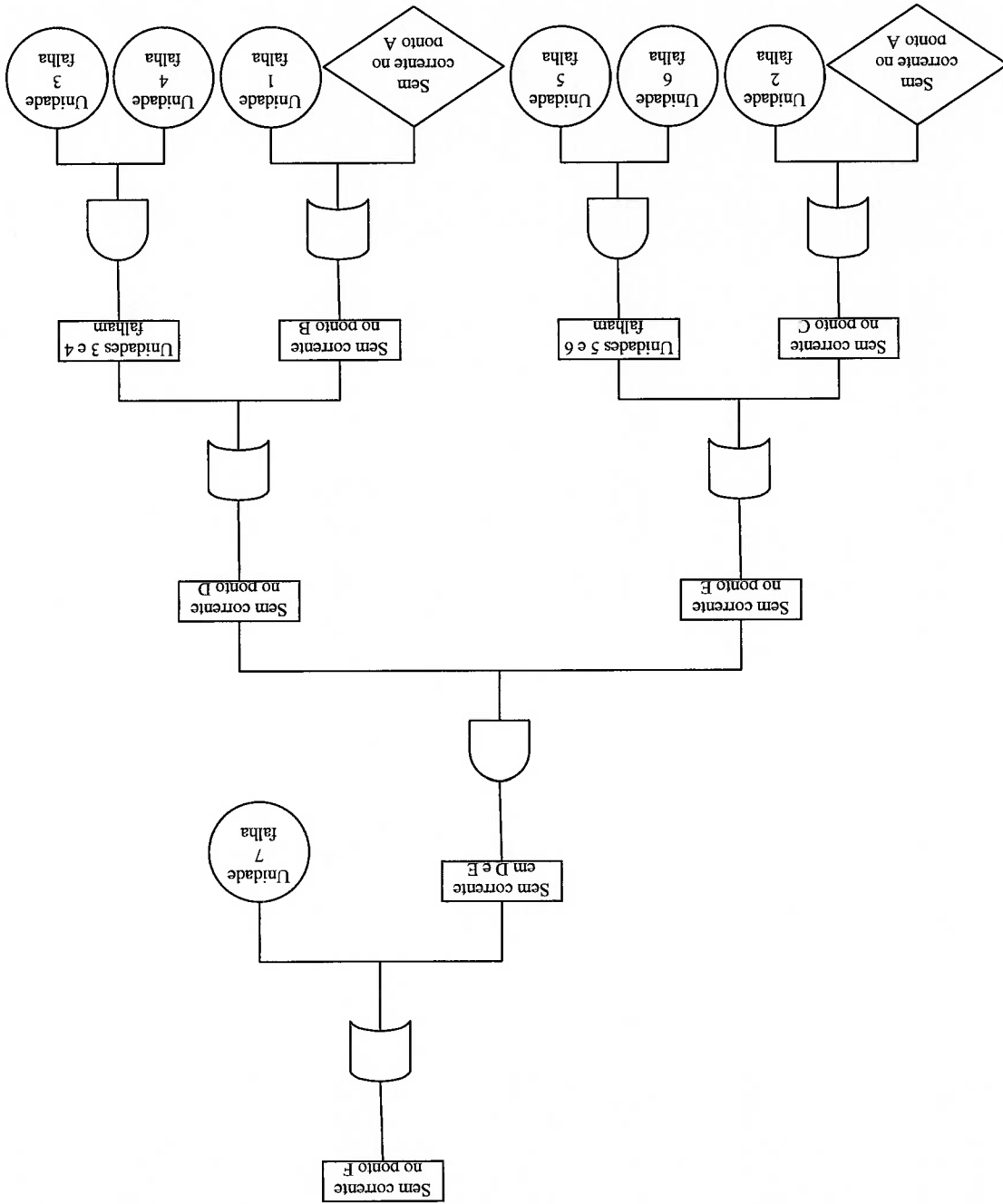
Figura 14 - Exemplo de Sistema Complexo

A seguir apresenta-se a representação em árvore de falhas do



Um exemplo de um estudo baseado quase exclusivamente nesta ferramenta é o estudo de oliveira et al. (1991) sobre o projeto do Manifold OCTOS 1000 da Petrobras.

Figura 15 - Árvore de Falhas



A técnica do FMEA, aplicada estritamente como concebida, tem a desvantagem de ser uma análise indutiva (SUNDARARAJAN, 1992), exclusivamente qualitativa, e considera modos de falhas independentes e, portanto, pode ser de uso mais restrita em sistemas em que a ocorrência de modos de falhas

efeitos indesejáveis. Esta ferramenta, basicamente, parte da definição das funções dos sistemas e subsistemas analisados, verificando em seguida as falhas que afetam cada função e todos os modos de falha que levam a cada falha. Para cada modo de falha, analisam-se os efeitos e define-se a necessidade de ações para reduzir a possibilidade de ocorrência deste evento, eliminá-lo ou, simplesmente, reduzir ou controlar os

importante na análise de sistemas ainda na fase conceitual. Mode and Effect Analysis”) é uma ferramenta poderosa e provavelmente a mais utilizada hoje para a análise de sistemas já existentes, porém, também pode ser muito A análise de modos e efeitos de falhas (ou FMEA de “Failure

### 3.4 - FMEA E FMCA

A árvore de eventos é uma representação de uma sequência lógica de eventos de causa e efeito. A ferramenta representa tanto a sequência em casos de sucesso como em casos de falhas.

### 3.3.3 - Árvore de eventos

As árvores de sucessos são ferramentas mais raramente usadas em controladores lógicos programáveis, ou sistemas supervisórios de unidades automatizadas, ou ainda, em sistemas lógicos de segurança. confiabilidade e aplicadas em geral a sistemas lógicos de operação como desencadeada por sequências de sucessos.

Esta ferramenta é análoga à árvore de falhas, sendo porém a lógica

### 3.3.2 - Árvore de sucessos

O segmento comercial aeronáutico foi o primeiro a traduzir e utilizar, de forma prática, os conceitos de confiabilidade, trazendo-o para o mercado, aplicando-o principalmente na área de manutenção. O processo RCM, ou manutenção centrada em confiabilidade, foi definido pela primeira vez por F.S. Nowlan e H.F. Heap (NOWLAN; HEAP, 1978), dois funcionários da United Airlines. O livro destes autores, publicado pelo departamento de defesa norte-

### 3.5 - RCM

múltiplos simultâneos é possível devido a causas comuns. Este tipo de ocorrência é chamado por Guimarães (2003) de Modo de Falha de Causa Comum.

O FMECA, ou análise de criticidade de modos e efeitos de falhas, é uma extensão do FMEA que permite uma abordagem mais quantitativa do estudo do sistema. Para alguns autores, esta criticidade pode ser definida através de um parâmetro chamado de Número de Prioridade de Risco, o RPN (do inglês, "Risk Priority Number"). Este número pode ser calculado, por exemplo, como o fator da probabilidade de ocorrência de uma falha com a probabilidade da não-deteção desta falha e a severidade da falha.

Pillay et al sugerem em seu trabalho a utilização de um método baseado em lógica fuzzy para determinação deste número de prioridade.

Como visto na definição de risco, o FMECA pode ser interpretado ou utilizado já como uma ferramenta de análise de risco.

Uma análise baseada em FMECA será apresentada mais adiante no exemplo de aplicação com a utilização de outro tipo de avaliação de prioridade.

Vale ressaltar que o FMECA é um aprofundamento do FMEA e portanto este termo é raramente utilizado sendo em geral substituído pela forma mais geral, o FMEA.

A análise de FMEA ou FMECA pode também ser uma ferramenta muito abrangente envolvendo aspectos de segurança de pessoas, das instalações e do meio-ambiente e na maioria dos casos é difícil distinguir a análise exclusivamente para um destes aspectos.

americano em 1978, foi o resultado de vinte anos de pesquisa e testes na aviação comercial americana, um processo que resultou no documento de 1968 "MSG-1, Manual: Avaliação de Manutenção e Desenvolvimento de Programa", e no documento de 1972, "MSG-2, Documento de Planejamento de Programa de Manutenção para Companhias Aéreas / Fabricantes de Avioes" – ambos os documentos patrocinados pela ATA (Associação do Transporte Aéreo da América) (NETHERTON, 1999 apud SIQUEIRA, 2003). Desde 1978, apesar de utilizarem o mesmo nome, o processo foi redefinido inúmeras vezes por diferentes autores perdendo-se de alguns elementos-chave, inicialmente definidos pelos criadores da técnica. Em busca de uma padronização, em 1999, a SAE (Sociedade de Engenheiros Automotivos) publicou um padrão (SAE JA1011, 1999 apud SIQUEIRA, 2003) definindo um conjunto de critérios necessários para que um processo pudesse ser chamado de "RCM" da forma como previram seus criadores, Nowlan e Heap (1978). Este padrão se baseou, além do livro de Nowlan e Heap (1978), em manuais da marinha norte-americana definindo diretrizes de processos de manutenção centrada em confiabilidade para armamentos e aviação naval, e no livro RCM2 de John Moubay (1997).

O livro de John Moubay (MOUBRAY, 1997) é o mais largamente utilizado no Brasil como referência já que, além de traduzido, é também apresentado no mundo inteiro por subsidiárias da empresa criada por Moubay para a divulgação comercial (cursos e palestras) e consultoria para implantação do RCM.

Os critérios da SAE definem sete perguntas que devem necessariamente ser respondidas por qualquer processo para ser considerado RCM, conforme a seqüência a seguir (SAE JA1011, 1999 apud SIQUEIRA, 2003):

- Quais são as funções e padrões de desempenho do ativo associados, desejados, na(s) função(s) operacional(is) em seu contexto atual?
- De que formas ele pode falhar ao deixar de cumprir suas funções (falha funcional)?
- O que causa cada falha funcional (modos de falha)?
- O que acontece quando ocorre cada falha (efeitos da falha)?
- Qual é a importância de cada falha (conseqüências da falha)?

O padrão também estabelece que o processo deverá ser revisito periodicamente, porém não estabelece prazo para tal revisão. Para facilitar e sistematizar ainda mais o processo, Moubay (1997) desenvolveu planilhas padronizadas de preenchimento e diagramas de decisão para responder adequadamente a cada uma das sete perguntas estabelecidas pelo padrão SAE (SAE JA1011, 1999 apud SIQUEIRA, 2003) (relembrando que foi o padrão SAE que se baseou no livro de Moubay).

Fica claro, ao se analisar os sete tópicos acima, que, pelo menos as quatro primeiras questões podem ser respondidas através de um estudo FMEA, voltada para a manutenção, que busca classificar de forma mais sistemática as consequências de falhas e especifica as ações corretivas necessárias. Mais especificamente, classifica todas as tarefas de manutenção que devem ser analisadas para definição de um plano de manutenção. O resultado do RCM é, na realidade, o estabelecimento de políticas de gerenciamento de falhas, de um pacote de reprojeto e dos tipos de falhas que são aceitáveis, também chamados de política “rodar até falhar”. Neste último caso, definem-se os modos de falha em que nenhuma ação é necessária, viável ou interessante.

O padrão define também como responder a cada uma das perguntas acima através de 55 tópicos de orientação.

- f. O que deve ser feito para prevenir ou prevenir cada falha (tarefas pro-ativas e intervalos das tarefas)?
- g. O que deve ser feito caso uma tarefa pro-ativa inadequada não possa ser encontrada (ações padrão)?

## **4 - CONFIABILIDADE NA INDÚSTRIA E EM**

### **PROJETOS**

#### **4.1 - CONFIABILIDADE NA MANUTENÇÃO**

##### **4.1.1 - Evolução da manutenção**

Assim como os conhecimentos sobre falhas, a manutenção pode ser dividida em três grandes gerações que denotam a evolução de sua abordagem ao longo do tempo.

Na primeira geração, antes da segunda guerra mundial, a indústria era pouco mecanizada, a produtividade era baixa e o tempo de indisponibilidade de equipamentos por falhas não trazia consequências importantes. A baixa tecnologia em materiais e métodos de fabricação não permitia ao projeto uma análise de vida útil de um equipamento sendo, portanto, as máquinas construídas super dimensionadas, para durarem o maior tempo possível. Neste cenário é natural entender que a manutenção se reduzia a consertar as máquinas quando estas falhavam.

Durante e após a segunda guerra mundial, ocorreu uma súbita mecanização das indústrias. A medida que a indústria passou a depender mais das máquinas, os tempos de parada de máquinas começaram a ganhar um peso mais importante na cadeia produtiva e, portanto, as perdas por quebras de máquinas começaram a ficar mais evidentes. Nasceu então o consenso de que seria interessante evitar as quebras de máquinas e aumentar a vida útil das mesmas. Surgiu assim, a manutenção preventiva que, nesta época, consistia apenas de uma revisão geral das máquinas de maneira periódica com intervalo fixo. O custo de manutenção passou a representar uma parcela importante do custo da cadeia produtiva, trazendo então ao desenvolvimento das áreas de planejamento e controle de manutenção. Desta forma, esta segunda geração se baseou em maior disponibilidade e vida útil dos equipamentos e custos menores.

Na década de 70, junto com o advento da automatização, apareceu também o conceito de “expectativas”. Novas tendências mundiais de manufatura

A utilização mais prática da confiabilidade hoje no mercado é encontrada na área de manutenção. Com a pressão sobre custos fixos e, portanto, sobre custos de manutenção, sem porém esquecer a busca constante por redução de custos unitários, a manutenção chegou à seguinte encruzilhada: como reduzir custos sem afetar a confiabilidade da instalação? Para tanto, se faz necessário saber medir esta confiabilidade e, conseqüentemente, buscar melhorá-la.

#### **4.1.3 - Importância da confiabilidade na manutenção**

As técnicas de estudo de confiabilidade junto à manutenção surgiram do conceito de que todo equipamento, peça, ou máquina, é colocado em serviço para cumprir uma ou mais funções. Uma máquina não tem razão de existir por si só e deve existir apenas para cumprir as funções para a qual foi desenvolvida. Desta forma a maioria das técnicas existentes no mercado definem a manutenção como toda ação efetuada para garantir que os equipamentos, ou máquinas, continuem a cumprir as funções desejadas. Por assim dizer, segundo Moubrey (1997), o RCM, ou Manutenção Centrada em Confiabilidade, é chamado desta forma porque reconhece que a manutenção só pode recuperar a capacidade interna ou confiabilidade inerente a qualquer máquina.

#### **4.1.2 - Técnicas de confiabilidade na manutenção**

como o "Just-in-time" e a elevada necessidade de disponibilidade em alguns setores como saúde, telecomunicações, processamento de dados e construções, levando-os fortalecimento dos parâmetros disponibilidade e confiabilidade, tornando-os estratégicos para o negócio. Neste mesmo período apareceram as exigências de qualidade, segurança e meio-ambiente tornando mais complexa a busca por redução de custos e aumento de produtividade. Desta forma, a terceira geração se caracteriza pela busca por maior disponibilidade e confiabilidade da maquinaria, maior segurança, melhor qualidade dos produtos, ausência de danos ao meio-ambiente, maior vida útil dos equipamentos e maior eficiência com relação aos custos de manutenção.

Os resultados recentes dos novos estudos apontaram os seis padrões de falha citados anteriormente, e também, uma tendência dos equipamentos de falha em direção a dois padrões de falha predominantes, o de falha mais complexos em direção a dois padrões de falha aleatória. Estes dois padrões são os que melhor descrevem os equipamentos eletrônicos e a busca por qualidade em sua manufatura. Com o aumento da automatização e eletrônica das grandes plantas e unidades industriais, a idéia generalizada, de que sempre existe uma relação entre a idade da instalação e a confiabilidade, demonstrou-se errada. Esta idéia levava à conclusão de que, quanto mais um equipamento era revisado, menor era sua probabilidade de falha. Hoje se sabe que, a menos que exista um modo de falha predominante relacionado à idade, o envelhecimento colabora muito pouco para a redução da confiabilidade e, ao contrário da idéia anterior, acredita-se hoje que a revisão de um equipamento pode até diminuir sua confiabilidade ao introduzir mortalidade infantil em sistemas estáveis. Após a aparição deste conceito, algumas

detalhamento exigido em cada caso.

O conhecimento dos modos de falha permite o direcionamento do banco de dados de manutenção, indicando para onde olhar e o que observar. Definindo-se os modos de falhas significativos pode-se, não apenas padronizar um banco de dados, mas também, orientar todos os envolvidos sobre o nível de

rápida?

Por exemplo, em uma planta petroquímica, toda vez que uma bomba falha, o histórico é armazenado no banco de dados com a descrição da falha como "Falha da bomba". Ora, em alguns casos excepcionais, armazena-se o histórico com alguma descrição mais detalhada como "Desgaste do rotor da bomba", ou ainda com outras descrições como "Vibração da bomba", ou ainda, "Baixo rendimento da bomba". Ao se tentar localizar e gerar um dado estatístico de falhas de bombas, fica difícil levantar no banco de dados qual o conjunto de eventos e, portanto, descrições que representam todas as falhas em bombas. Ainda pior, imagine tentar levantar dados de falhas em rotores de bombas. Como saber se os eventos "Baixo rendimento da bomba" ou "Falha da bomba" são causados por falhas de rotores em uma busca

complexas, refere-se à geração de histórico.

Um problema, freqüente na manutenção de plantas ou unidades



empresas abandonaram a manutenção preventiva, porém é importante ressaltar que para falhas com consequências significativas, deve-se atuar para evitar que as falhas ocorram ou para reduzir suas consequências.

Hoje, a manutenção é praticada na maioria das empresas nacionais, e apresentada pela maioria dos autores, em três formatos distintos. A manutenção corretiva é aquela que se concentra exclusivamente na solução de uma falha após sua ocorrência. A manutenção preventiva é aquela executada, de acordo com certos parâmetros, que podem ser, por exemplo, tempo ou estado (no caso de estado também pode ser chamada de preditiva), para prevenir a ocorrência de falhas. O monitoramento é a atividade da manutenção efetuada sem o intuito de corrigir um problema, mas de possibilitar a realização de uma intervenção programada (preventiva) caso sejam encontrados indícios de que a falha está prestes a ocorrer.

Na década de 90, a política de manutenção nacional baseava-se na realização de manutenção preventiva e monitoramento. Em algumas empresas chegou-se a resultados de tal forma que 98% de todos os recursos de manutenção eram dedicados à manutenção preventiva e monitoramento. Assim, praticamente não havia a ocorrência de falhas. No final da década ficou claro que estas empresas desperdiçavam recursos prevenindo falhas de forma muito mais dispendiosa do que se permitissem a ocorrência de alguns tipos de falhas.

O estudo de confiabilidade permite a busca pelo equilíbrio correto de manutenção preventiva, monitoramento e manutenção corretiva ao se buscar níveis de confiabilidade interessantes para o negócio, como visto no capítulo 2.1.

De acordo com Carvalho (2003), o engenheiro de manutenção deve conhecer hoje seis axiomas básicos para o sucesso da manutenção. Estes axiomas fazem clara alusão aos conceitos que estamos tentando passar sobre confiabilidade:

- A manutenção hoje não pode ser considerada como função independente da proteção ambiental, energia, segurança e saúde
- A função da manutenção é manter a função
- O fato dos equipamentos envelhcerem não significa que estão mais sujeitos a falhas

• Não são as falhas mas sim suas consequências que são importantes

Uma técnica já aplicada há muito tempo e que demonstra a aproximação da confiabilidade com o dia-a-dia operacional é o uso da árvore de falhas para solução de eventos pontuais, em geral associada ao diagrama de Ishikawa (também conhecido na indústria como “Espinha de peixe”).

portanto, deve ter noções do quanto cada uma de suas ações afetam essa podem contribuir para o aumento ou a diminuição da confiabilidade da planta e, operador de unidades industriais deve hoje executar ações e tomar decisões que no dia-a-dia do pessoal de operação. De acordo com Wolfram e Owen (1991), o qualidade do produto, segurança e impacto ambiental é hoje cada vez mais exigida confiabilidade operacional, tanto em aspectos de continuidade da produção como de exclusivamente ao projeto ou à manutenção de unidades. Ora, vale lembrar que a Frequentemente, a confiabilidade é erroneamente associada

## COMPLEXOS

### 4.2 - A EXTENSÃO PARA A OPERAÇÃO DE SISTEMAS

Este último axioma se baseia em dois fundamentos principais. O primeiro é da tendência de se buscar uma decisão a partir de dados estatísticos cuja origem é desconhecida, como se fossem dados determinísticos. Isto é, assumir que um dado estatístico é válido para qualquer outra condição em qualquer época. O segundo é aquele descrito anteriormente neste estudo, sobre a validade dos dados históricos. O excesso de dados é cada vez mais uma causa da perda de qualidade destes dados. Frequentemente busca-se extrair informações de dados que não são os mais adequados ao objetivo.

informações inadequadas sobre taxa de falhas.

- As decisões devem frequentemente ser tomadas com base em

falhas. Obs.: Equipamentos idênticos podem ter manutenções distintas

- Manutenção pro-ativa é para reduzir e evitar as consequências das

A árvore de falhas permite aos operadores do sistema analisarem um evento de maneira reversa ao que é normalmente feito em projeto ou manutenção, buscando encontrar todas as causas para um determinado evento ou efeito. Este tipo de estudo permite também, em alguns casos, a identificação de outros diversos modos de falha.

As figuras 16 e 17 mostram um exemplo característico de uma análise de evento cuja consequência potencial é de um impacto ambiental e poderia ser caracterizado previamente por uma análise de confiabilidade durante a fase de projeto. O caso apresentado é de um evento de transbordamento de um silo de carregamento de grãos de polietileno durante a manobra de enchimento. A árvore de falhas busca indicar todas as formas possíveis de ocorrência desta falha enquanto o diagrama de Ishikawa identifica as causas fundamentais mais prováveis para a ocorrência deste evento.

As identidades de pessoas e empresas foram removidas já que não são de interesse para este trabalho.

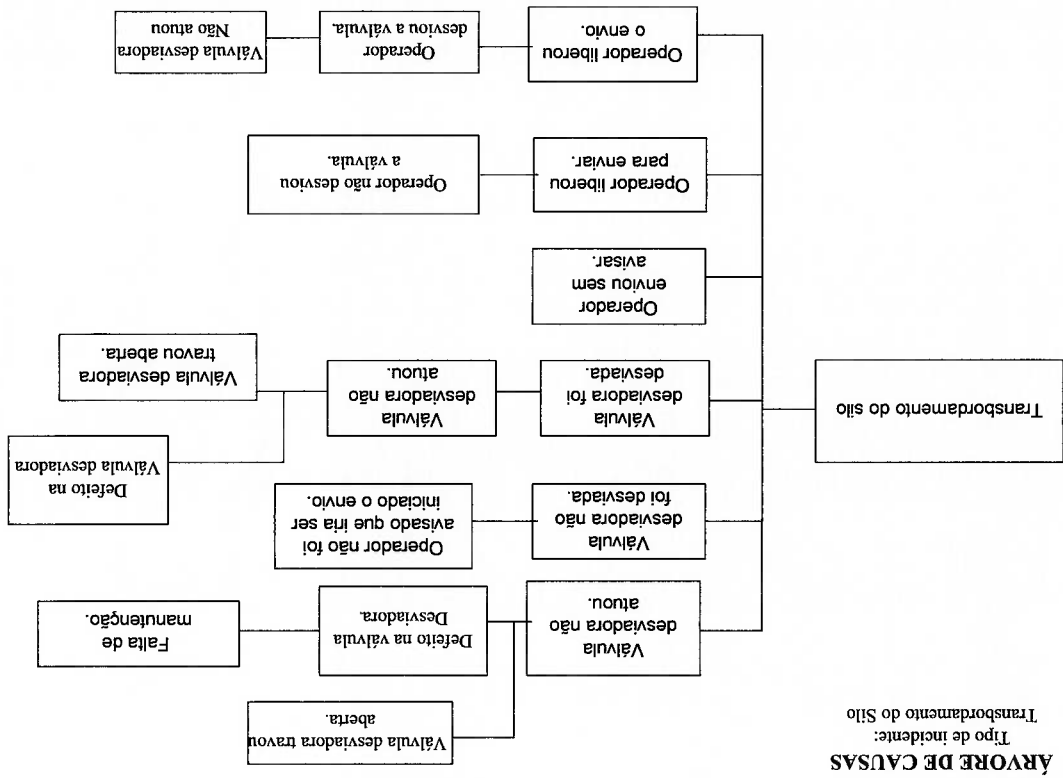
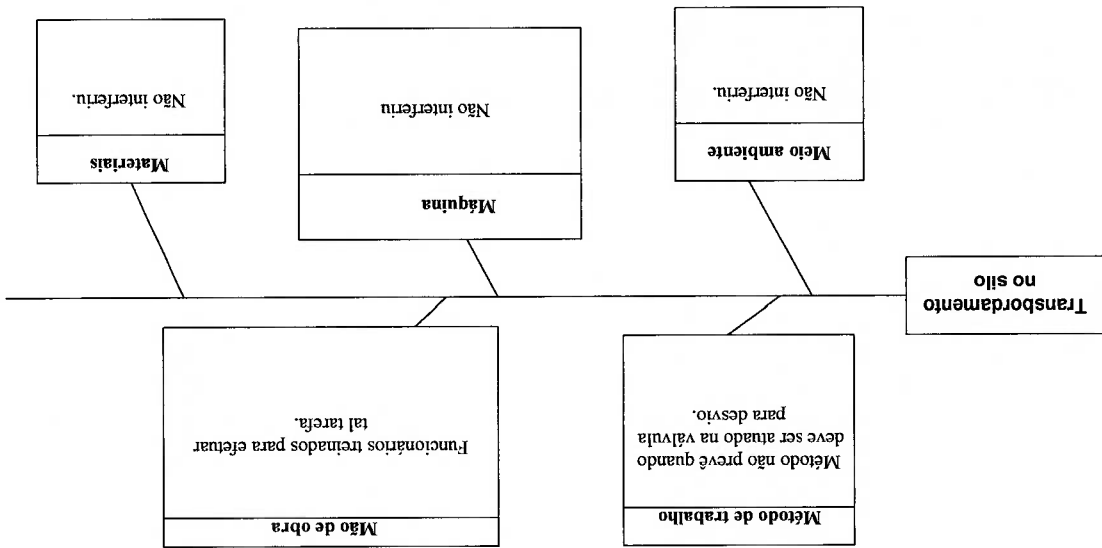


Figura 16 - Exemplo de árvore de falhas para impacto ambiental

**Diagrama de Ishikawa**  
 Tipo de acidente :  
 Transbordamento no silo



**Figura 17 - Exemplo de Diagrama de Ishikawa para impacto ambiental**

Ao efetuar este tipo de análise, os funcionários da operação tornam-se aptos a identificar todos os fatores que podem levar à falha deste sistema e, portanto, adquirem uma visão mais aprofundada de sua influência na confiabilidade operacional desta instalação.

Por outro lado, os sistemas de gestão ambiental, disseminados hoje em praticamente todos os setores industriais, exigem a elaboração, por cada empresa, de uma ferramenta de análise de riscos e efeitos ambientais. Estas ferramentas são na realidade análises buscando identificar para cada operação ou atividade quais são os efeitos e quantificar seu risco e amplitude, baseando-se em alguns modos de falha padronizados, dados em geral por:

- Geração de efluente líquido
- Geração de emissão gasosa
- Geração de resíduos sólidos
- Emissões de energia
- Emissão de radiação
- Consumo de recursos naturais

No caso da ISO 14000, norma ambiental mais difundida no país e ferramenta tem recebido um formato padronizado pelas empresas certificadoras e recebe o nome de "Matriz de Levantamento de Aspectos e Impactos Ambientais".

A figura 18 mostra parte de um exemplo de matriz de avaliação de aspectos e impactos ambientais de uma indústria química. A matriz foi efetuada para a atividade de análise de processo em um dos laboratórios da empresa e através de um algoritmo simples procura definir se cada impacto gerado é significativo ou não ("S" ou "NS") e se deve ser efetuada alguma ação de controle para minimizar o impacto.

Número da Matriz: MA-P-037		Data: 05/12/2003		Revisão: 0	
Área: Laboratório		Atividade, produto ou serviço: Análise de Processo			
<b>MATRIZ DE AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS AMBIENTAIS E SEUS IMPACTOS.</b>					

ELEMENTOS DA ATIVIDADE	ASPECTO AMBIENTAL	IMPACTO AMBIENTAL	SITUAÇÃO DO ASPECTO	EXAME						CONTROLE	
				AVALIAÇÃO			EXAME				
				G	A	F	L	T	Tratamento	significativo	
1) Controle de processo conforme IMA, ICP, IIE da Resina.	Gerção de Resíduos Plásticos (Tuff e Pellets) devido ao manuseio da amostra (peletis)	Contaminação do esgoto pluvial	Normal	1	3	3	3	AI	10	S	Armazenamento em local apropriado e posteriormente comercializado conforme Programa Cíno S.
				1	3	3	3	AI			
2) Serviço de rotina	Gerção de Lixo Comum	Contaminação do esgoto pluvial	Normal	1	1	3	3	AI	10	S	Resíduo enviado para aterro conforme (CA 595-Z73) (coleta seletiva)
				1	3	3	3	AI			
3) Papel utilizado nas impressoras	Gerção de sucatas de papel	Contaminação do esgoto pluvial	Normal	1	1	3	3	AI	10	S	Resíduo enviado para aterro conforme (CA 595-Z73) (coleta seletiva)
				1	3	3	3	AI			

Figura 18 - Parte de Matriz de Aspectos e Impactos Ambientais

Novamente vale ressaltar que este tipo de levantamento deve ser realizado diretamente pelos operadores responsáveis destas atividades, com supervisão de seus superiores de forma a tomarem conhecimento da forma como suas atividades podem trazer impactos à confiabilidade da unidade, neste caso, em relação à segurança ambiental.

As figuras 19 e 20 representam um exemplo de um evento que transcurre de uma falha operacional, isto é, uma falha causada por uma manobra incorreta do operador, que provoca o desligamento de um sistema. O exemplo se refere a um evento de desligamento emergencial de um reator de polimerização após a perda do controle de pressão. O controle de pressão do reator é efetuado por quatro válvulas de controle, sendo necessárias para absorver grandes oscilações do sistema, sendo pelo menos duas semi-abertas, em funcionamento. O exemplo mostra que duas válvulas já estavam entupidas, operava-se o reator com apenas duas válvulas em operação e, portanto, a instalação não possuía mais redundância. Devido a uma obstrução repentina de uma ou até das duas válvulas restantes perdeu-se o controle de pressão, sendo, portanto, necessário o desligamento completo do reator. A falha é neste caso chamada de falha operacional pois o evento de entupimento de válvulas de controle é normal e esperado. Para tanto existe a redundância e a decisão de não providenciar a regulamentação imediata das válvulas redundantes (desentupimento) levou à ocorrência da falha.

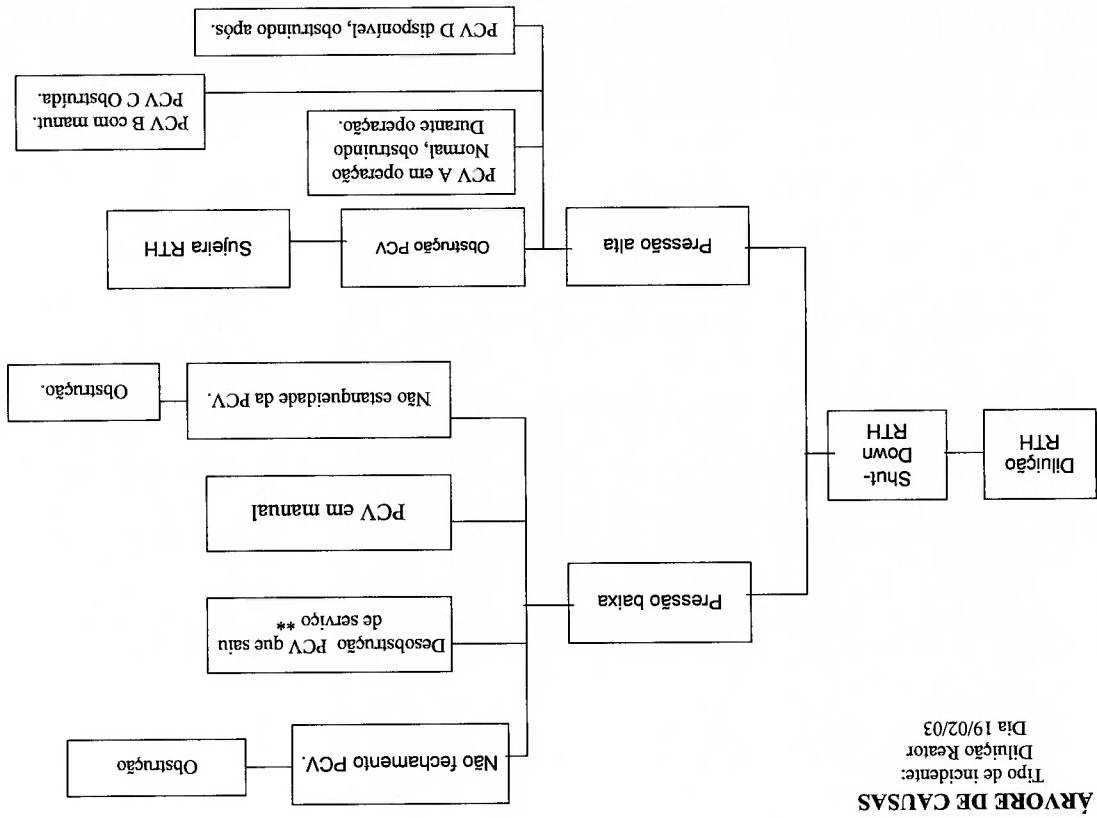


Figura 19 - Exemplo de Árvore de Falhas para evento de operação

Apesar de ser possível analisar a confiabilidade de sistemas e identificar eventos como este, em geral não existe a abordagem direta no estudo de confiabilidade de falhas humanas ou até de ações destrutivas. Estas em geral acabam sendo levantadas em discussões do tipo "brain-storming" ou até como consequência de outros estudos mais abrangentes. Um exemplo nítido deste tipo de fator é o evento recente de atentados com o uso de aviões nos E.U.A. Apesar de todo o desenvolvimento de ferramentas e aplicações de estudos de confiabilidade na aviação civil norte americana, não existiam medidas de prevenção para ações voluntárias que pudessem causar a queda de um avião ou até seu lançamento contra um edifício. Apenas em 2004, o órgão responsável pela segurança aérea neste país declarou o desenvolvimento de sistemas a prova de falhas humanas para este tipo de evento. Estes sistemas se caracterizam por um conjunto de sensores que identificam a manobra incorreta (como aproximação de um obstáculo) e caso não ocorra a correção da manobra, o sistema automaticamente o faz, independentemente da ação do piloto.

Figura 20 - Exemplo de Diagrama de Ishikawa para evento de operação

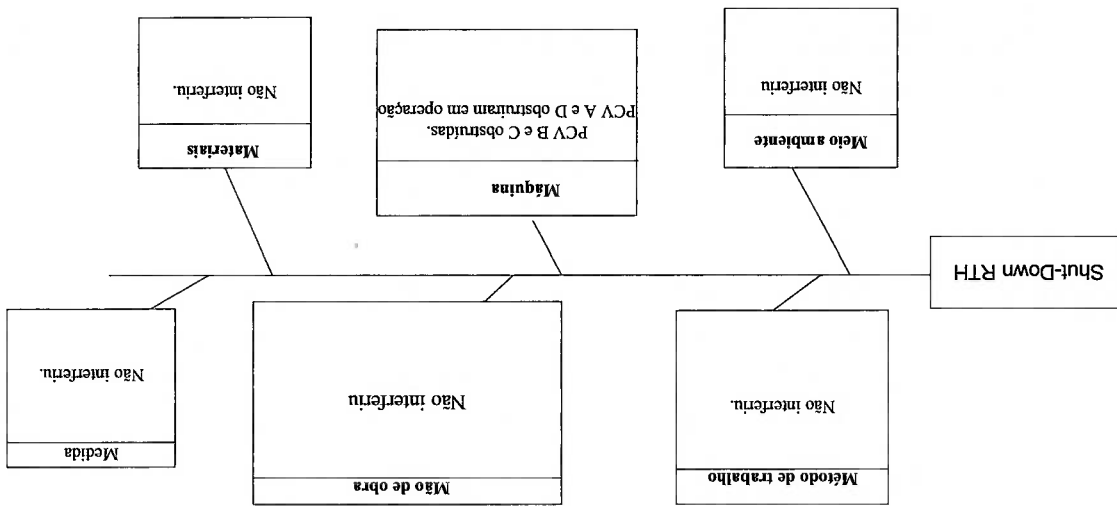


Diagrama de Ishikawa  
Tipo de acidente:  
Difusão Reator  
Em 19/02/03

Este tipo de sistema já é usual em algumas indústrias químicas e petroquímicas e é chamado de sistema a prova de falhas. Apesar da denominação, estes sistemas levam a instalação segura de forma independente da vontade ou ações dos operadores. Vale lembrar o axioma de Murphy (GUMARÃES, 2003) que diz que nada pode ser feito à prova de burrice. Desta forma, pode-se afirmar que sistemas denominados “a prova de falhas” são na realidade sistemas que buscam prever as ações indevidas de operadores e, portanto, não garantem uma eficácia total, principalmente quando o operador é mais criativo do que o projetista do sistema poderia prever.

Algumas empresas buscam aplicar FMEA em alguns estudos de processo e, mais frequentemente, o Hazop.

Neste tipo de caso, FMEA e Hazop não se caracterizam como uma análise de confiabilidade completa já que não efetuam uma análise quantitativa dos riscos e até por que, no caso do Hazop, por tratar de segurança de processos em indústrias químicas, busca-se quase sempre risco zero.

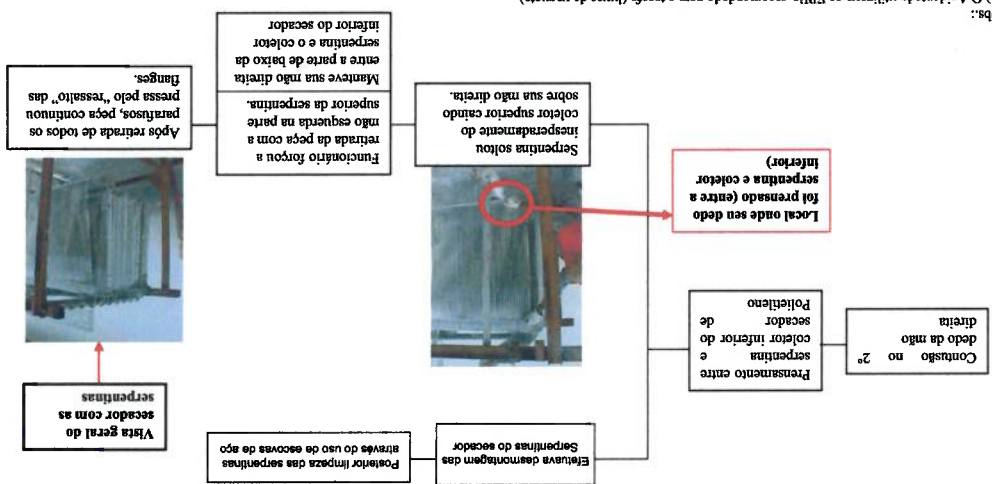
Assim, para análise de processos e operações de forma mais objetiva sugere-se, também neste caso, o início de uma abordagem quantitativa buscando os benefícios oferecidos pelo estudo de confiabilidade.

Os dois primeiros exemplos acima, representados nas figuras 16 a 20, são eventos relacionados com a instalação e poderiam ter sido previstos em análises de confiabilidade da instalação, podendo chegar a estes efeitos e, conforme resultados, poderiam ter sido evitados com alguma ação preventiva, caso isto fosse necessário e interessante.

No exemplo a seguir, representado nas figuras 21 e 22, o evento se refere a atividades quase que independentes da instalação e é consequência da falta de uma análise mais aprofundada do método de trabalho. O exemplo relata um acidente decorrido durante a atividade de limpeza de uma serpentina de um secador de leito fluido. O trabalho se caracteriza pela desmontagem de diversos módulos e limpeza com escova rotativa de cada módulo. Existe uma área e ferramentas desenvolvidas especificamente para esta atividade. A consequência do evento foi uma fratura em um dedo da mão direita do funcionário. As identidades de pessoas e empresas foram removidas já que não são de interesse para este trabalho.



**ARVORE DE CAUSAS- PRELIMINAR**  
 Tipo de acidente COM AFASTAMENTO  
 Dia 04/02/2003 - 15:40 h  
 Acidentado -  
 Função Isolador  
 Empresa-



Obs.:  
 1) O Acidentado utilizava os EPI's recomendado para a tarefa (luvas de vaqueta) e o Funcionário acidentado participou desta arvore de causas :  
 2) Ação corretiva/preventiva- Condição de dispositivo de segurança em forma de "gancho" evitando a queda do módulo da serpentina após retirada dos parafusos ( Res-ponável , até 14/02/03)  
 3) Participaram desta arvore de causas : e o Funcionário acidentado

Figura 21 - Exemplo de Arvore de Falhas para evento de segurança

Este exemplo demonstra a necessidade da ampliação do conceito de confiabilidade levando-o a considerar inclusive os métodos de trabalho e manuseio visando a confiabilidade no que se refere à prevenção de acidentes.

Para este tipo de ocorrência as empresas desenvolvem diversas ferramentas semelhantes de análise de riscos. A mais usual é chamada em alguns casos de "Análise Preliminar de Riscos do Trabalho" e em outros de "Análise de Riscos do Trabalho". De maneira análoga a aquelas apresentadas anteriormente, esta ferramenta busca analisar, do ponto de vista da segurança, quais são as possibilidades de ocorrência de acidentes ou incidentes, qual a probabilidade destes ocorrerem e quais são as medidas preventivas, ou ações, que podem ser tomadas para reduzir ou anular o risco. A figura 22 representa a Análise de Riscos do Trabalho efetuada para esta instalação, excepcionalmente, após o acidente. Este tipo de análise deve ser efetuado em caráter preventivo e, assim como as análises de abrangência ambiental, esta também é uma exigência obrigatória de diversas certificações de segurança como OHSAS 18001.

A análise identifica todos os aspectos de risco para a segurança e saúde dos funcionários envolvidos na atividade. Assim como no caso da análise ambiental, não há quantificação dos riscos e supõe-se que qualquer risco identificado deve ter uma ação de controle ou deva ser eliminado. A ação de controle pode ser um treinamento adequado, o uso de equipamentos de segurança, a identificação do local, etc. O exemplo da figura mostra algumas propostas de melhorias na instalação para eliminar os riscos identificados, inclusive o causador do acidente. As identidades de pessoas e empresas foram removidas já que não são de interesse para este trabalho.

**ANÁLISE DE RISCOS NA TARFEA - PE N.º 02 /2003**

N.º	ETAPAS QUE COMPÕEM O RISCO	RISCOS	EPI	RECOMENDAÇÕES DE SEGURANÇA	OBSERVAÇÕES
-----	----------------------------	--------	-----	----------------------------	-------------

1	Instalar e montar módulos de sapatas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Queda</li> <li>Prisionamento das mãos</li> <li>Queda de módulos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capacete</li> <li>Luvas de couro</li> <li>Protetor articular</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utilizar sempre o guarda de módulo quando sobre os parafusos.</li> <li>Ver recomendações de melhorias nº 01 em anexo.</li> </ul>	
2	Transportar o módulo para limpeza	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ergonómico</li> <li>Lesões</li> <li>Prisionamento</li> <li>Choque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Protetor articular</li> <li>Luvas de couro</li> <li>Capacete</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Carregar o módulo sempre em duas pessoas</li> </ul>	

3	Colocar o módulo sobre o cavalete	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prisionamento do módulo</li> <li>Queda do módulo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capacete</li> <li>Luvas de couro</li> </ul>		
4	Limpeza do módulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prisionamento</li> <li>Queda de peças</li> <li>Lesão pelo corte com a escova de limpeza</li> <li>Prisionamento das mãos</li> <li>Queda de partículas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capacete</li> <li>Luvas de couro</li> <li>Protetor articular</li> <li>Máscara contra pó</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Após trocar a escova designar o seu desconectar imediatamente ou desmontar a escova totalmente.</li> <li>Não permitir ninguém nas proximidades quando da utilização da escova.</li> </ul>	

5	Aplicar módulos sobre as grades	<ul style="list-style-type: none"> <li>Queda dos módulos</li> <li>Prisionamento das mãos</li> <li>Lesões por quedas de módulos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capacete</li> <li>Luvas de couro</li> </ul>		
6	Retirar / Colocar chapas separadoras	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lesão nas mãos por prisionamento</li> <li>Queda de chapas</li> <li>Ergonómico</li> <li>Queda funcional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capacete</li> <li>Luvas de couro</li> <li>Protetor articular</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sempre utilizar as hastas (trabalhar por pares) e chapas para facilitar a movimentação das mesmas.</li> <li>Ver recomendações de melhorias nº 01 em anexo.</li> </ul>	

**PROPOSTA DE MELHORIA - ART 02 /2003**

TARFEA: Limpeza dos módulos da serpentina  
DATA: 29/04/03

N.º	Atividades	Responsável pela ação	Prazo de execução	Status
1	Instalação de plataforma nos dois lados dos cavaletes para apoio do funcionário		30/08/03	
2	Fazer furos nas chapas para fixar por parafusos as hastas de pega para movimentação das mesmas		30/08/03	
3				
4				

Figura 22 - Exemplo de Análise de Riscos do Trabalho

### 4.3 - CONFIABILIDADE NA FASE CONCEITUAL

Os modos de falha e seus efeitos, se definidos previamente, na etapa de projeto, podem servir de base para formação do banco de dados de manutenção.

A partir da definição dos principais modos de falhas a equipe de engenheiros de projetos pode desenvolver ferramentas próprias ou utilizar ferramentas existente como FMECA ou Árvore de Falhas para a realização do estudo de confiabilidade do projeto.

Segundo Castro Silveira e Luchesi Cavalc (SILVEIRA; CAVALLCA, 2001), para a elaboração de um estudo de confiabilidade robusto (para um sistema robusto em relação a incertezas inerentes), durante a fase de projetos, dever-se-ia necessariamente passar por três etapas:

- Formulação do modelo físico-matemático do sistema em estudo
- Definição dos critérios de falha (ou modos de falha)
- Aplicação dos modelos de incerteza para determinação dos limites de

confiança dos parâmetros de projeto significativos.

O método de aplicação de modelos de incerteza pode ser semelhante a um estudo Hazop. Ao contrário do FMEA ou FMECA, que analisa eventos de falha para buscar as causas, neste método se altera alguns parâmetros de funcionamento, analisando os efeitos sobre o sistema e verificando a ocorrência ou não de uma falha.

Na fase conceitual, o estudo de confiabilidade deveria ser necessariamente uma das etapas obrigatórias de uma espiral de projetos.

No estudo de Oliveira et al. (1991), sobre o manifesto OCTOS 1000 da Petróbras, foi utilizada a Árvore de Falhas para realização do estudo de confiabilidade, o que resultou em alterações e recomendações importantes para o aumento da confiabilidade do sistema.

Fica claro que o estudo de confiabilidade, com o auxílio de uma ferramenta sistemática, só pode ser adequadamente utilizado em projetos já com um nível de detalhamento avançado para levar em conta as influências dos diversos

O parâmetro  $\alpha$  é chamado de fator de crescimento e é uma representação da eficiência do programa de confiabilidade.  $\alpha$  varia de 0 a 1, embora 1 não seja viável na prática e para valores elevados (próximos de 1) representa um programa de testes dedicado à melhoria da confiabilidade enquanto que para valores baixos indica que a confiabilidade não é uma prioridade.

onde:

- $T$  é o tempo de operação
- $n_f$  é o número de falhas ocorrido após um tempo  $T$  de funcionamento
- $\alpha$  e  $m$  são constantes

$$\ln\left(\frac{T}{n_f}\right) = \alpha \cdot \ln(T) + m \quad (33)$$

$\ln(T)$  é aproximadamente linear, da forma:

modelo, se após um período tiver ocorrido  $n$  falhas, então a relação de  $\ln(T/n_f)$  com confiabilidade, doravante denominado de modelo Duane. De acordo com este 1965 por Duane (1965) que sugeriu o modelo de curva de aprendizado para funcionamento, evitando a reincidência da falha. Esta característica foi estudada em análise-se e tomam-se decisões sobre alterações de projeto e de condições de particularidade fica ainda mais clara quando, em período de testes, a cada falha ocorrência desta, principalmente se trouxer consequências importantes. Esta cada nova falha, aprende-se mais sobre a instalação e geram-se ações para prevenir a instalações bem geridas, o MTBF tende a crescer. Isto se explica pelo fato de que, para analisando-se situações reais constata-se que, em geral, para

#### 4.4 - A FASE DE TESTES – O MODELO DE DUANE

objetivos de confiabilidade esperados.

acontecer do conceito geral de uma instalação ou unidade dificultar o alcance dos possível, ainda nas etapas iniciais do projeto conceitual. De fato, verifica-se que pode básica dos aspectos de confiabilidade mais exigidos seja realizada, sempre que componentes de um projeto. Por outro lado é importante exigir que uma verificação

Quando representadas em um gráfico log-log (MTBF X Tempo), as curvas de  $M_c$  e  $M_i$  são duas retas paralelas distanciadas de  $(1-\alpha)$ . Este gráfico, chamado de gráfico de Duane, permite o recolhimento de diversas informações, como a projeção do MTBF após um certo período de operação, ou o tempo necessário para se atingir um dado MTBF requerido. O modelo de Duane mostra-se portanto um modelo importante para estabelecer o período de testes, baseado simplesmente em confiabilidade, permitindo uma aproximação razoável do tempo necessário para se alcançar um MTBF desejado e portanto uma confiabilidade desejada.

-  $M_i$  é chamado de MTBF instantâneo

onde: -  $M_c$  é o MTBF acumulado

$$M_i = \frac{M_c}{(1-\alpha)} \quad (34)$$

Conforme apresentado na eq.(22),  $T/n_f$  pode ser entendido como um MTBF acumulado já que representa o acúmulo de falhas ao longo do tempo até a última falha. Como se sabe agora que o MTBF tende a ser crescente ao longo do tempo, então para se conhecer o valor do MTBF a qualquer instante após a última falha, pode-se projetar a curva de crescimento através da fórmula:

## 5 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO

### 5.1 - CONTEXTO

O exemplo apresentado neste trabalho foi efetuado ao longo de 2003 e 2004 em uma planta petroquímica no Brasil. O sistema estudado trata de um conjunto malaxador de polietileno (PE). Este conjunto, em um processo contínuo, mistura o polietileno e os aditivos em pó, aquece-os formando uma massa uniforme e fornece energia mecânica para dar as características mecânicas necessárias ao produto fundido. Em seguida o produto fundido é enviado para um sistema de extrusão e granulação que forma o produto final para venda: polietileno aditivado em grãos.

A figura 23 mostra um desenho simplificado do princípio de funcionamento de um malaxador, também chamado de misturador contínuo. As letras apresentadas na figura descrevem o funcionamento do malaxador como um todo.

O estudo partiu com diversos objetivos. O conjunto da instalação, denominado neste exemplo de sistema de malaxagem, possuía certa ociosidade por ter capacidade de produção superior aos processos anteriores na cadeia produtiva da empresa. O que a empresa calculava como disponibilidade era na realidade a relação entre as perdas de produção por falhas de manutenção e a produção total do sistema. Um estoque intermediário na cadeia produtiva, antes do sistema estudado, permitia que uma das unidades de malaxagem (o sistema é composto de diversas unidades de malaxagem independentes) ficasse parada por até 5 dias sem afetar a cadeia produtiva a montante da unidade. A ociosidade do sistema permitia que, em caso de paradas por manutenção, a produção fosse recuperada em seguida pelo aumento de produção do sistema.

Desta forma, ainda que a política de manutenção fosse baseada em paradas de cerca de 6 a 8 horas, mensalmente, de cada unidade de malaxagem, os indicadores da empresa mostravam uma disponibilidade do sistema quase sempre igual a 100%.

O sistema é de conceito antigo e formado por máquinas com mais de trinta anos. A empresa passou por uma série de reestruturações e mudanças organizacionais como descentralização das atividades de manutenção e posteriormente terceirização dos serviços de manutenção. A unidade em questão foi também submetida a uma série de modificações para aumento de capacidade, melhoria de qualidade do produto, aumento de segurança das instalações, dos funcionários e para o meio ambiente, melhorias ergonômicas e até para ganhos em manutenção. Como consequência de todas estas mudanças, a documentação, histórico e conhecimentos gerais de manutenção e operação ficaram incompletos. Começaram então a surgir dúvidas sobre aspectos operacionais do sistema, como os sistemas de proteção e até sobre condições seguras de operação do sistema. Diversas paradas e perdas de produto por qualidade ocorriam sem que a causa fosse facilmente identificada.

Com o processo contínuo de aumento de capacidade da cadeia produtiva, a diversificação dos produtos oferecidos e a constante busca por redução de custos fixos, o sistema de malaxagem começou a transparecer como um possível futuro gargalo para a produção ou um futuro entrave para ganhos de capacidade, qualidade e competitividade.

Por outro lado, a atividade de manutenção da empresa vinha trabalhando em uma situação plenamente controlada, com horas executadas de manutenção planejada superando 95% das horas totais disponíveis. A área de manutenção vinha ano a ano melhorando indicadores de disponibilidade e custos e sua área de engenharia vinha buscando áreas de atuação onde pudesse continuar buscando ganhos significativos em todos os seus indicadores. Após um estudo de O.E.F. ("Overall Equipment Efficiency"), eficiência operacional global, efetuado em toda a planta, quantificando dados de disponibilidade, eficiência e qualidade de equipamentos e efetuando uma análise de benchmarks ficou constatado que em termos de manutenção o sistema de malaxagem era um dos focos potenciais de melhoria.

Baseado em todos estes eventos o grupo de engenharia de manutenção da empresa em conjunto com a gerência de produção, determinou que a



A figura 23, a seguir, é uma representação esquemática do princípio de funcionamento de um malaxador. Nesta figura, a letra A aponta para a região de alimentação do malaxador. O polímero e os aditivos em pó ou grão são alimentados para dentro da máquina onde caem sobre os rotores. Este desenho indica dois rotores girando em sentido opostos como é o caso dos equipamentos deste estudo. Na região indicada pela letra B os rotores têm formato de rosca e simplesmente transportam o produto adiante, gerando uma pressão na região

## 5.2 - DESCRIÇÃO DO MALAXADOR

SIQUEIRA, 2003).  
por não atender a todos os critérios estabelecidos pela SAE (SAE JA1011, 1999 apud porém conforme apresentado no capítulo 3.5, esta não pode ser denominada RCM, A metodologia implementada acabou sendo semelhante à do RCM, instalações foram consideradas intoláveis e foram analisados de forma específica. Eventos que traziam riscos à saúde das pessoas, ao meio-ambiente ou às não eram representativos da criticidade das consequências, foram tratados de maneira Os eventos para os quais os custos não poderiam ser estimados, ou risco é quantificado é o custo de manutenção devido à ocorrência de falhas. manutenção. Conforme a definição apresentada para risco, neste caso o evento cujo análise de confiabilidade, efetuando uma análise de riscos baseados em custos de manutenção decorrentes de eventos de falhas. O estudo buscou então ir além da representar os objetivos, seria estabelecendo-a a partir dos custos de operação e forma de medir a eficiência das ações decorrentes deste estudo, de forma a informações utilizadas no estudo e dos seus resultados. Entendeu-se que a melhor medição e criou-se uma metodologia de análise que permitisse a quantificação das para uma análise quantitativa. Assim, definiram-se objetivos e parâmetros de avaliação de seus resultados, decidiu-se que o estudo deveria ser ampliado, seguindo De forma a buscar o máximo aproveitamento do estudo e permitir a confiabilidade do sistema com uma abordagem baseada em FMEA.  
forma mais apropriada de ganho nesta instalação era de um re-estudo completo de

seguinte. A região C é propriamente a zona de malaxagem. Nesta região, a camisa é aquecida com vapor. O aquecimento, junto com a pressão gerada pela rosca da região B e a restrição controlada por uma válvula na descarga, faz com que o produto se funda em uma massa homogênea de polímero e aditivos sendo descarregada pela região D. Na região D encontra-se uma válvula acionada por um pistão permitindo o aumento ou diminuição da carga do malaxador. Neste estudo esta válvula é chamada de orifício do malaxador. A conjunção de temperatura e abertura desta válvula define algumas das principais propriedades físicas do produto final. A letra E indica as engrenagens responsáveis pela transmissão do torque para o segundo rotor. A transmissão do redutor para o malaxador se dá por apenas um eixo que é na prática um dos rotors. Esta engrenagem transmite o torque para o segundo rotor em sentido contrário. A letra F indica os mancais do lado acoplado e não acoplado com o sistema de selagem que, particularmente no caso do lado acoplado, inclui um sistema chamado de viscosal, uma peça cônica circundada por uma rosca sem fim que serve simultaneamente como labirinto e bomba para o produto que tende a sair do equipamento. A letra G indica a posição do redutor. O acionamento do redutor pode ser feito tanto por um motor de corrente contínua, portanto com rotação variável, como por um motor de corrente alternada, acoplado a um acoplamento magnético. Neste caso, o motor tem rotação constante e o acoplamento magnético permite o controle da rotação do malaxador, transmitindo mais ou menos rotação. Este acoplamento é chamado de Positron. As duas configurações são levadas em conta neste estudo, tanto a de motor de corrente contínua, quanto a de motor de corrente alternada acoplado a um Positron.

A figura 24 é uma foto do mesmo malaxador representado esquematicamente na figura anterior. Esta foto permite uma visualização melhor dos diferentes componentes que o constituem. Este tipo de malaxador é especial para certos tipos de produtos específicos e é caracterizado por um corpo bi-partido. Este tipo de malaxador não é aplicado na instalação a ser apresentada neste estudo.

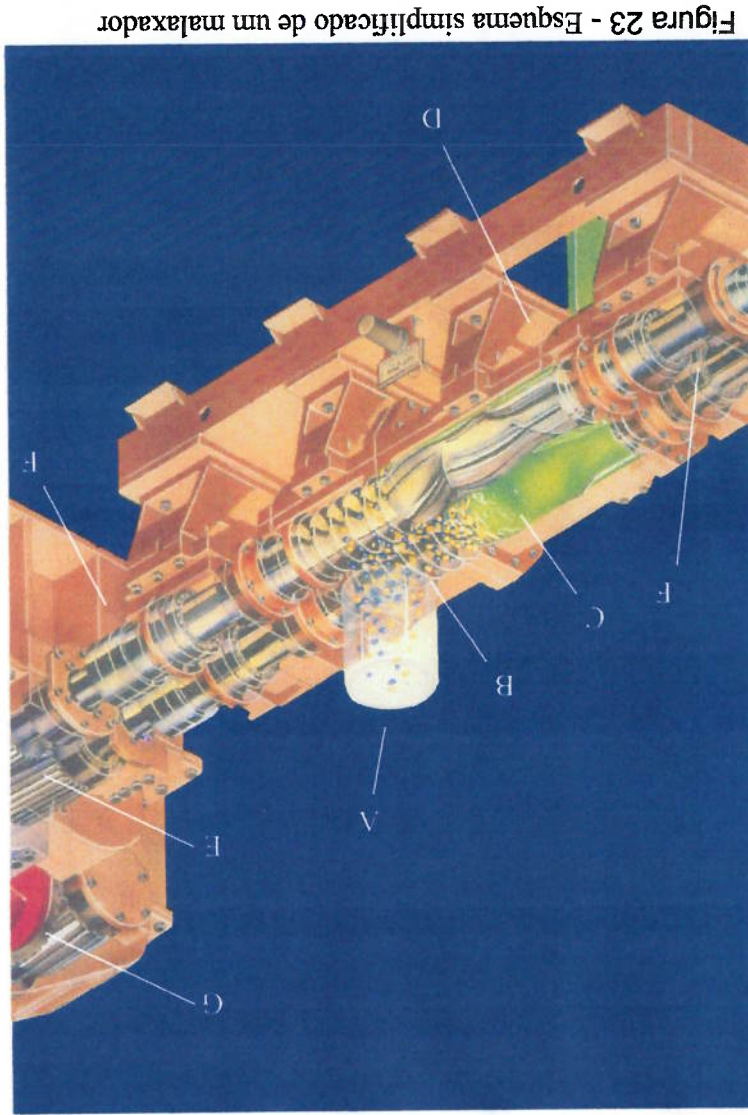


Figura 23 - Esquema simplificado de um malaxador

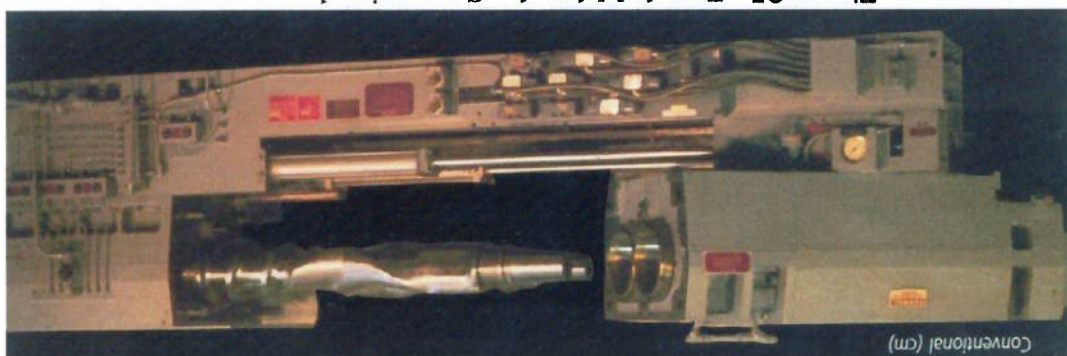


Figura 25 - Foto de Malaxador Convencional

A figura 25 é uma foto de um malaxador convencional, semelhante aos modelos estudados neste exemplo. Neste tipo de máquina o corpo é formado por um bloco único, assim como as camisas que formam, portanto, uma câmara estanque onde é injetado o vapor para aquecimento do produto, sem contato do produto com o vapor. A foto foi tirada com o malaxador aberto. Este tipo de abertura, com auxílio de trilhos e pistões, permite a rápida e fácil inspeção e limpeza periódica dos rotores e das camisas. A abertura também é necessária em algumas situações de falha em que ocorre resfriamento e endurecimento do produto no interior do malaxador.

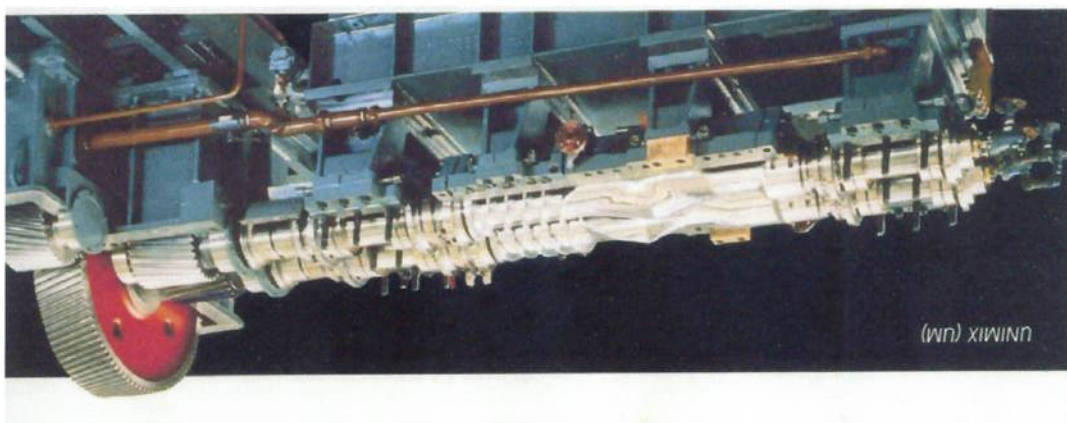


Figura 24 - Foto de Malaxador com Corpo Bi-partido

---

**Sistema: Malaxador**

De forma semelhante ao FMEA, definiu-se que o sistema seria representado por um malaxador, sendo então subdividido em 6 subsistemas (ver anexo 1), compostos da seguinte forma:

Definiu-se que, apesar de existirem diversas unidades de malaxagem semelhantes, o estudo poderia ser feito para uma única unidade e os aspectos diferentes entre as unidades deveriam ser levados em consideração durante o estudo. Decidiu-se que, apesar de existirem diversas unidades de suas fronteiras e interfaces. Definindo os subsistemas a serem estudados, especificando também respectivamente definindo o sistema a ser estudado, suas fronteiras e interfaces, e em seguida O trabalho foi iniciado com a elaboração de um diagrama de blocos

### **5.3.2 - Sistema e Sub-Sistemas**

Porém, devido a uma nova reestruturação e falta de disponibilidade de pessoal, foi efetuado um treinamento em FMEA com a participação exclusiva de engenheiros de processo e engenheiros, coordenadores e supervisores de manutenção. O trabalho foi iniciado com a mesma equipe, porém, logo, devido à falta de empenho e disponibilidade de pessoal, o trabalho passou a ser efetuado exclusivamente pelo pessoal de manutenção e ainda assim interrompido diversas vezes em épocas de auditorias, parada geral da planta ou outros eventos importantes.

A idéia, a princípio aceita pela gerência de produção, era de que um estudo do tipo FMEA neste caso era importante pela falta de documentação e histórico confiável disponível e que devido ao baixo nível de conhecimento deste sistema em seus aspectos operacionais, este modelo poderia trazer resultados importantes em todos os aspectos de confiabilidade, produtividade, qualidade, impacto ambiental e segurança. Desta forma, ficou acordado que o grupo de trabalho para elaboração deste estudo deveria envolver pessoas de operação, manutenção e projeto e ainda dos níveis engenharia, supervisão e operação.

### **5.3.1 - Princípio**

## **5.3 - DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA DE ANÁLISE**

X – Permitir a partida do malaxador quando necessário (manutenibilidade)  
IX – Permitir que sejam feitas manutenções quando necessário  
VIII - Sinalizar quanto a condições anormais de funcionamento anormalidade  
VII - Garantir que o sistema desligue imediatamente em caso de comprometer o meio-ambiente  
VI - Malaxar garantindo segurança pessoal, patrimonial e sem V - Malaxar sem contaminar a resina  
IV - Malaxar sem deteriorar a resina  
III - Malaxar sem perda de produto em pó  
II - Malaxar sem perda de produto fundido  
24 h / dia.  
mínima definida, com fluidez definida, em regime de trabalho de  
I - Transformar PE em pó em PE fundido com produtividade

**Funções:**

**Sistema: Malaxador**

secundárias do sistema malaxador (ver anexo 2):

Foram então estabelecidos os componentes fundamentais de cada subsistema sendo estes os componentes que poderiam de fato influenciar no resultado do estudo. Assim, foram encontrados entre 2 e 13 componentes por subsistema totalizando 54 componentes.  
Em seguida foram então definidas as 10 funções primárias e

- Malaxador
- Acionamento
- Lubrificação
- Unidade hidráulica
- Proteção e controle
- Aquecimento e resfriamento do malaxador

**Subsistemas:**

Desta forma, para cada modo de falha se estudaram os seus efeitos e qual a disposição ou contingência adotada na época do trabalho caso viesse a

falha definidos seriam independentes.

situações de dependência explícita, poder-se-ia considerar que todos os modos de consideração do estudo. Portanto, assumiu-se que, com o cuidado para se evitar não se poderia garantir de fato a independência dos eventos, esta passou a ser uma definido como queima de bobina, qualquer que seja sua causa. Como, ainda assim modo de falha de travamento por causas de origem mecânica e outro modo de falha estes eventos independentes, separou-se o travamento em dois eventos sendo um lubrificação ou até a queima das bobinas podem levar ao seu travamento. Para tornar exemplo. Diversas causas podem levar ao travamento do Positron. Falhas na independência de outros modos de falha ou modos de falha de causa comum. Por complementado com informações sobre suas causas de forma a buscar sua se tornar independente de outro modo de falha. Isto é, o modo de falha deveria ser que cada modo de falha especificado deveria ser detalhado a ponto de sua ocorrência de cada falha. Assim, para mais adiante se poder quantificar os resultados, definiu-se portanto, a necessidade de se gerar diagramas de árvores de falhas para a ocorrência também uma análise mais qualitativa e descritiva das cadeias de eventos sem, possível, não se basear tanto sobre estas informações. Desta forma, procurou-se crítica dos históricos e dados operacionais disponíveis e assim, buscou-se sempre que Por ser um dos objetivos deste estudo, buscou-se uma análise mostram parte do estudo, com alguns dos modos de falha identificados.

cada um dos componentes seriam identificados os modos de falha. Os anexos analisado um subsistema e, portanto, cada componente de cada subsistema e que para trabalho e apresentada no anexo 3, estabelecendo que para cada falha funcional seria Desenvolveu-se então uma planilha, acordada com o grupo de

### 5.3.3 - Planilha

Para cada função acima foram então definidas as possíveis falhas funcionais, sendo encontradas entre 1 e 4 falhas funcionais por função, totalizando 18 falhas funcionais identificadas para o sistema como um todo.

Neste caso, em que o sistema é existente e funcional há mais de trinta anos, o papel do histórico, apesar de ser pouco confiável, é de apresentar possíveis efeitos não identificados ao longo do estudo, levar em consideração alterações feitas nos equipamentos que poderiam alterar os efeitos identificados ou até gerar novos modos de falhas e também de confirmar com eventos históricos a importância ou gravidade de alguns modos de falhas.

## a) Histórico

Para tanto, foram então acrescentados outros dados à planilha e ao estudo. A seguir serão apresentadas uma descrição e particularidades de cada campo desta planilha.

As planilhas dos anexos 3 a 6 foram desenvolvidas de forma a poderem servir de referência no futuro para investigação de ocorrências e permitirem que possam ser atualizadas facilmente sempre que houver alguma modificação na instalação, na política de manutenção ou operação ou, até mesmo, em revisões periódicas do estudo.

Para os efeitos relacionados a ações de operadores o questionamento era: "Seria possível que o operador não constataste a falha ou não atuasse para evitar seus efeitos? Se afirmativo, qual seria o efeito seguinte?" Nos casos em que se identificou propagação de efeitos esta foi detalhada na tabela até que o último efeito sem ação do operador fosse atingido, a menos que esta ação fosse evidente ou inevitável. Em alguns casos, foram inclusive consideradas operações incorretas, principalmente em casos em que o modo de falha se caracteriza por sinalização indevida.

Neste ponto, é importante ressaltar que este tipo de estudo frequentemente identifica modos de falha ou efeitos de falhas para os quais não se tem histórico ou não há interesse em se utilizar o histórico. Portanto, sendo o grupo de trabalho formado por coordenadores, supervisores e engenheiros de manutenção, a pergunta repetida caso o histórico de ocorrência de um dado modo de falha não existisse ou não fosse utilizado era: "O que você faria hoje se isto acontecesse?". E para todos os modos de falha, mesmo aqueles em que havia histórico de ocorrência: "O que aconteceria se este modo de falha acontecesse?".



O campo de recomendação imediata está definido para que, caso seja identificado um modo de falha cujo risco é intolerável, isto é, algum modo de

### **c) Recomendação Imediata**

Caso não haja nenhum histórico de falha ou não seja possível calcular o MTBF de um dado modo de falha, utiliza-se o MTBF esperado. Ele é na realidade calculado como sendo o inverso da probabilidade de ocorrência do modo de falha. Esta probabilidade é calculada baseada na experiência dos participantes e em dados dos fabricantes das peças e equipamentos.

acompanhamento de sua evolução. O MTBF é importante também pois, mesmo se não for identificado ao longo do estudo, após o estudo, com a adequação do banco de dados, poderá ser identificado e acrescentado ao estudo, permitindo assim o seu monitoramento e o neste formato.

MTBF deste modo de falha, pelo menos desde que o banco de dados foi constituído classificado no banco de dados da mesma forma, permitindo assim a obtenção da ocorrência. Por outro lado, o modo de falha IA3, "Quebra do rotor do malaxador" é como queima do motor, não havendo, portanto, como distinguir o MTBF de cada e IA8, "Flash-Over no coletor do motor F1", no banco de dados constam apenas de falha IA5, "Queima da bobina da armadura", IA7, "Queima da bobina do campo" Isto fica claro no estudo já que, por exemplo, no anexo C, os modos baseado nos mesmos modos de falha e o histórico é impreciso e incompleto.

O MTBF pode para alguns modos de falhas ser identificado, ainda que conforme descrito anteriormente, o banco de dados não tenha sido formado

### **b) MTBF**

O histórico permite também esclarecer se o modo de falha ou seus efeitos aconteceram regularmente ao longo do tempo, têm se tornado mais frequentes, menos frequentes, deixaram de acontecer ou não aconteciam e passaram a acontecer. Isto é, o histórico permite avaliar a evolução do modo de falha e seus efeitos.

Para garantir a lógica do objetivo do estudo, definiu-se que o MTRR seria calculado para a recolocação da instalação em marcha. Assim caso haja

#### e) MTBF e MTRR

A seguir são apresentados os campos, presentes nos anexos 4 a 6, sobre os quais a quantificação foi baseada.

anexo 6.

- Situação prevista após a aplicação das recomendações de modificações da instalação e da política de manutenção (identificada pelo índice (1)), apresentada no instalação existente (identificada pelo índice (0)), apresentada no anexo 5.

- Situação fictícia sem nenhum plano de manutenção preventiva ou preditiva, com a manutenção existentes (identificada sem índice), apresentada no anexo 4.

- Situação na época do estudo, levando em consideração a instalação e o plano de distintas:

para avaliar a confiabilidade do sistema de maneira quantitativa em 3 situações Na sequência do estudo criaram-se novas planilhas e sistemáticas

acompanhamento da evolução das ações recomendadas no estudo.

É importante que mesmo após o término do estudo, caso a recomendação seja implantada, seja apontada no estudo para registro e

ser adotadas para minimizar a ocorrência de cada modo de falha ou de seus efeitos.

até, em alguns casos, uma modificação da instalação ou do processo que poderiam estudo este campo foi estabelecido para definir as ações preventivas e preditivas ou

durante o estudo seja identificado uma melhoria, esta seja apontada. Na sequência do O campo de outras recomendações está definido para que caso

#### d) Outras recomendações

registrar novamente no estudo a solução, assim que implantada.

solução implantada, se possível, ao longo do estudo. Neste caso é importante pequeno porém de solução muito simples, este possa ser imediatamente apontado e a

falha que possa trazer algum risco grave à operação ou à instalação ou ainda um risco

Estes parâmetros definem os modos de falhas cujo risco é intolerável. Assim, M.A. é o parâmetro que define se o modo de falha ou seus efeitos podem trazer algum impacto significativo ao Meio Ambiente e Seg. se podem trazer risco à saúde dos funcionários ou às instalações em grande escala. Estes parâmetros são resolvidos optando pelas soluções “S” ou “N” para “Sim” ou “Não”.

#### f) M.A. e Seg.

No anexo 6 os valores de MTBF e MTRR são estimados para a situação após a implantação do plano de manutenção e de modificações de instalação recomendadas no estudo. Neste caso devido a possíveis recomendações de modificações de instalação ou de processo, a situação em que  $MTTR(1) \neq MTTR(0)$  se traduz pela busca do aumento da manutibilidade ou até mesmo sua redução em benefício de algum dos outros fatores.

- MTBF(1) e MTRR(1)

Fica claro neste caso que em geral  $MTTR = MTTR(0)$ .

corretiva).

Os valores de MTBF e MTRR são, neste caso, a estimativa para a situação fictícia de inexistência de plano de manutenção (apenas manutenção

- MTBF(0) e MTRR(0)

Os valores de tempo médio entre falhas e tempo médio entre intervenções são definidos a partir do histórico, ou na sua ausência, da experiência dos participantes ou até de recomendações dos fabricantes.

- MTBF e MTRR

substituição de alguma peça ou subsistema completo, o MTRR não leva em conta o tempo de reparo da peça ou subsistema danificado.

Novamente fica claro que em geral estes parâmetros devem se caracterizar por  $M.A.(0) = M.A.$  e que  $Seg.(0) = Seg.(1)$  e também, necessariamente, se  $M.A. = "S"$  então  $M.A.(1) \neq M.A.$  e se  $Seg. = "S"$  então  $Seg.(1) \neq Seg.$ .

### g) Custo Qual.

O custo da qualidade é neste caso definido como uma estimativa dos custos representados por perdas por produção de produtos fora da especificação de qualidade para cada evento do modo de falha em questão. Devido aos diferentes efeitos para cada modo de falha, deve neste caso ser considerado o caso em que as perdas são mais importantes e basear a estimativa nestas perdas. Neste trabalho foram adotados valores pré-definidos de produtividade da instalação e, portanto, custo por tonelada de produto representado pelas perdas por qualidade.

Fica novamente claro que em geral  $Custo Qual.(0) = Custo Qual.$

### h) Custo Reparo

Este parâmetro é definido pelos custos de materiais e serviços para efetuar o reparo em cada modo de falha. Ao contrário do MTRR, este custo envolve, além do custo de substituição do equipamento, também o custo de reparo da peça ou subsistema danificado ou, até mesmo, o custo da peça ou equipamento novo caso este possa ser um dos efeitos. Neste caso, para simplificar o problema, não foram considerados custos internos de serviços, apenas custos contratados.

Para cada modo de falha, na existência de vários efeitos, a estimativa deve ser realizada baseada na pior situação possível.

Fica claro que em geral  $Custo Reparo(0) = Custo Reparo.$

### i) Outros Custos

Na existência de algum outro custo possível decorrente da falha, este também deve ser considerado.

## j) Custo Total

Somatória dos custos envolvidos com a falha, inclusive custos por perda de produção. Devido ao pulmão existente antes do sistema, considerou-se que uma parada inferior a 4 horas não gera custos por perda de produção já que esta é normalmente recuperável.

Desta forma, temos:

Se  $MTTR \leq 4$ :

$$\text{Custo Total} = \text{Custo Qual.} + \text{Custo Reparo} + \text{Outros Custos} \quad (35)$$

Se  $MTTR > 4$ :

$$\text{Custo Total} = k \cdot (MTTR - 4) + \text{Custo Qual.} + \text{Custo Reparo} + \text{Outros Custos} \quad (36)$$

k é um fator pré-definido a partir da produtividade da unidade e do custo por perda de produção.

Vale esclarecer que sem grandes variações de moeda ao longo do estudo, não existe a necessidade de uso de alguma moeda de referência ou fator de correção monetária. Os valores são definidos para cada modo de falha e por parâmetros representativos pré-definidos.

No caso de identificação de algum novo modo de falha, muito tempo após o término do estudo e, portanto, possa de fato ter ocorrido variação importante nos custos, recomenda-se a revisão de todos os valores e parâmetros de custos e não a aplicação de fatores de correção global. A experiência do autor em controle de custos e indicadores demonstrou que a evolução dos custos é muito discrepante em materiais e serviços e, além disto, entre diversas categorias de serviços ou materiais. Assim, algum modo de falha pode ter custos aumentando mais rapidamente por exigir mão de obra especializada e materiais importados enquanto outros podem se tornar menos importante devido à nacionalização de peças ou surgimento de representantes locais. Em casos de valorização da moeda nacional, o fenômeno contrário também pode ocorrer. Outros fenômenos específicos para diferentes categorias de materiais ou serviços também podem afetar a qualidade do estudo após uma revisão.

**m) Custo Médio da Falha**

Este valor permite uma primeira análise de ordem de grandeza ou de criticidade do modo de falha já que representa o seu impacto relativo em comparação com os outros modos de falha.

Ficou estabelecido que, caso M.A. = "S" ou Seg. = "S", então, este valor não é nem calculado e a posição é indicada por "X".

Fica claro neste caso que, em geral,  $\text{Custo Médio da Falha} \neq \text{Custo Médio da Falha (0)} \neq \text{Custo Médio da Falha (1)}$ .

Caso não seja efetuada nenhuma modificação ou recomendação que tenha efeito sobre o modo de falha, então, em geral,  $\text{Custo Médio da Falha} = \text{Custo Médio da Falha (1)} \neq \text{Custo Médio da Falha (0)}$ .

Assim como no campo anterior, o período considerado foi de um mês.

da eq.(10), da forma:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (38)$$

O campo é calculado conforme apresentado no capítulo 2, a partir período de um mês, considerando a taxa de falhas constante.

Este valor é dado pela probabilidade do modo de falha ocorrer no

**l) Probabilidade de Falha no Mês**

Para este caso, o intervalo considerado foi de um mês. Sendo o MTBF calculado em meses, então se substitui na eq.(37) t por 1.

expressão

$$R(t) = e^{-\frac{t}{\text{MTBF}}} \quad (37)$$

Este campo é calculado, conforme apresentado no capítulo 2, pela

**k) Confiabilidade de Falha no Mês**

Para alterações de processo, qualquer perda, seja ela de produção, melhorias. rendimento ou custos, gerada pela recomendação adotada deve ser indicada para aumentar a precisão do estudo. Da mesma forma, se alguma recomendação gerar

reanalisadas novas recomendações com prazo de retorno maior, visando novas de retorno, buscando alguma melhoria em médio prazo. Neste mesmo exemplo, após o término do estudo e implementação de todas as recomendações, poderão ser mantidas segundo os aspectos da confiabilidade podem ser adotados prazos maiores interessantes neste primeiro estudo. Fica claro que em instalações estudadas e esperado para o investimento é de 24 meses e prazos maiores ainda não são para se traduzir em custo mensal. Desta forma, fica claro que o prazo de retorno meses. Assim, o custo total do investimento ou da modificação é dividido por 24 ser representado por um prazo de retorno. Neste estudo o prazo considerado foi de 24 Para investimentos ou modificações das instalações, o custo deve

plano.

apenas para o modo de falha mais significativo ou aquele que é o foco principal do modo de falha, o custo deste pode ser dividido entre os modos de falha ou indicado Caso um dos planos adotados tenha influência em mais de um

considerando algumas particularidades conforme apresentado a seguir. para execução do plano de manutenção recomendado para cada modo de falha, Este parâmetro é o resultado de uma estimativa de custo mensal

#### **n) Custo Plano**

teste.

Assim, foram criados os seguintes parâmetros para realização deste

benefício.

recomendações de forma a se alcançar a solução com melhor relação custo / simular as condições oferecidas para diversas recomendações e conjuntos de sistema, foram acrescentados parâmetros em uma das planilhas que permitem trarão, de fato, um benefício ou retorno significativo para a confiabilidade do De forma a verificar se as recomendações feitas ao longo do estudo

Estes últimos casos se explicam pelo fato que caso a situação inicial envolvesse algum risco à segurança ou ao meio-ambiente e este deixa de existir devido à implantação de alguma recomendação, então esta é automaticamente

Médio da Falha (1) = "X";  
"X" e Custo Médio da Falha (1) = "X" ou Custo Médio da Falha (0) ≠ "X" e Custo parâmetro também pode adquirir a indicação "N" caso Custo Médio da Falha (0) = caso Custo Médio da Falha (0) = "X" e Custo Médio da Falha (1) ≠ "X". O mesmo Assim o parâmetro (Custo / Benefício) > 1? adquire a indicação "S" M.A.(1) ou Seg.(1) adquirissem o valor "S".

"X" caso, respectivamente, os parâmetros M.A. ou Seg., M.A.(0) ou Seg.(0) e Falha, Custo Médio da Falha (0) e Custo Médio da Falha (1) adquiriram as indicações Vale lembrar que, mais acima, definimos que Custo Médio da situações que serão descritas a seguir.

Este parâmetro também pode adquirir as indicações "S" ou "N" nas recomendações sejam maiores do que os benefícios e menor do que 1 caso contrário. diferença de benefícios é maior do que 1 caso os custos de implantação das Fica assim claro que a relação da diferença de custos com a conforme definido acima, Custo Plano (0) = 0.

O correto seria adotar Custo Plano (1) – Custo Plano (0), porém, caso contrário, "N". Se esta expressão é verdadeira, o campo adquire a indicação "S";

$$\left| \frac{\text{Custo Plano}}{\text{Custo Médio da Falha (1)} - \text{Custo Médio da Falha (0)}} \right| > 1 \quad (39)$$

Este parâmetro realiza efetivamente o seguinte teste lógico:

o) (Custo / Benefício) < 1 ?

Deve-se sempre buscar compor as três considerações acima para obter o resultado mais próximo da realidade. parâmetro.

ganhos de processo estes também devem ser apontados com sinal oposto neste



$$P_{0-1} = \prod_{i=1}^m R_i \quad (40)$$

falha no mês" pode ser calculada da forma:  
descrito anteriormente), a probabilidade associada ao evento "Não ocorrer nenhuma  
Considerando que não há correlação entre falhas (conforme

(a) Nenhuma falha no mês

combinações.

calculados a probabilidade de falha bem como o seu custo para algumas destas  
ocorrerem no mês. A seguir são mostrados exemplos de como poderiam ser  
a ocorrência de nenhuma falha até a possibilidade de todos os modos de falha  
necessário considerar que podem ocorrer diversas combinações de falha, isto é, desde

Para calcular a probabilidade de falha e o custo associado é

e o custo total associado a cada modo de falha.

para cada modo de falha,  $F(t)$ , a probabilidade da não ocorrência desta falha, ou  $R(t)$ ,  
custos, são introduzidos três campos na planilha que são: a probabilidade de falha

Para se efetuar a análise de confiabilidade e de riscos baseada nos

### 5.3.4 - Análise de Confiabilidade e Riscos

falhas sobre os custos de operação.

ou, propriamente dito, a verificação dos riscos do sistema em termos de impacto das  
Em seguida o estudo se caracterizou pela simulação de despesas

(Custo / Benefício) de forma a identificar focos de ação imediatos ou prioritários.

com indicação "S", foi também efetuada uma análise da amplitude desta relação,  
dos históricos e dos valores de MTBF. Para os parâmetros (Custo / Benefício) > 1?  
A sequência do estudo se definiu como a análise crítica dos efeitos,

recomendação ou o conjunto de recomendações não é benéfico e deve ser revisito.

benéfica. Se o risco continuar existindo, ou se não existir e passar a existir, então a

-  $F_i$  é a probabilidade de ocorrência de falha para o modo de falha  $i$ .

combinação. Fica claro que neste caso existe apenas uma possibilidade.

onde: -  $P_{m-1}$  é a probabilidade de ocorrer  $n$  falhas em uma primeira

$$P_{m-1} = \prod_{i=1}^m F_i \quad (42)$$

mês pode ser calculada da forma:

A probabilidade de ocorrer todas os modos de falha em um mesmo

(c) Todos os modos de falha no mês

x.

Neste caso o custo associado ao evento é o Custo Total do modo de falha

-  $F_x$  é a probabilidade de ocorrência de falha para o modo de falha  $x$ .

-  $R_x$  é a probabilidade de não ocorrência de falha para o modo de falha  $x$ .

falha  $x$  falhar e nenhum outro falhar ao longo do mês.

combinação  $x$ . Neste caso pode se também dizer que é a probabilidade do modo de

onde: -  $P_{1-x}$  é a probabilidade de ocorrer o evento de uma falha com uma

$$P_{1-x} = F_x \cdot \prod_{i=1}^{x-1} R_i \cdot \prod_{i=x+1}^m R_i = \prod_{i=1}^m R_i \cdot \frac{F_x}{R_x} \quad (41)$$

forma:

mês, sem que os outros falhem, pode ser calculada, para cada caso, da seguinte

A probabilidade de ocorrer a falha de um componente específico no

(b) Uma falha no mês

Neste caso o custo associado ao evento é zero.

-  $m$  é o número total de modos de falhas

-  $R_i$  é a probabilidade de não ocorrência de falha para o modo de falha  $i$ .

combinação. Fica claro que neste caso existe apenas uma possibilidade.

onde: -  $P_{0-1}$  é a probabilidade de ocorrer 0 (zero) falhas em uma primeira

- m é o número total de modos de falhas possíveis independentes

Neste caso o custo associado ao evento é a soma de todos os custos totais associados a cada modo de falha.

Vale lembrar que a análise poderia considerar também situações em que ocorressem duas ou mais vezes um mesmo modo de falha em um mês, porém, este tipo de evento é praticamente inexistente e não responde mais aos estudos de probabilidades porém à ocorrência de alguma nova influência não detectada ou não resolvida. Neste caso entra-se no mérito da competência na solução do problema, o que não é o objetivo deste estudo.

Após se calcular a probabilidade e o custo total associado a cada combinação possível de falhas é possível distribuí-las invertendo a associação, isto é criar o gráfico da função de densidade de probabilidade como função do custo total. A partir das propriedades de funções de densidade de probabilidade fica então possível estimar diferentes possibilidades de dispêndio, integrando a curva ao longo do custo total. Assim, é possível, por exemplo, definir a probabilidade das falhas apresentarem um custo superior a R\$ 50.000,00 em um único mês ou ainda a probabilidade das falhas apresentarem um custo inferior a R\$ 50.000,00 em um único mês ou até, a probabilidade das falhas apresentarem um custo entre R\$ 10.000,00 e R\$ 50.000,00 em um único mês.

Para efeito de definição da estratégia de manutenção pode-se então definir o risco do sistema associado ao custo ao se estabelecer o valor mínimo de probabilidade de ocorrência de falhas com custo inferior a um dado valor de referência ou um valor máximo de probabilidade de ocorrência de falhas com custo superior a um dado valor de referência.

Este tipo de análise é muito interessante, porém, sua implantação requer uma grande capacidade de processamento e memória numérica. O algoritmo deve levar em conta algumas considerações para evitar o cálculo de todas as combinações possíveis. Para um número de modos de falha pequeno, o algoritmo mais simples é aquele que armazena, para cada combinação de falhas, a probabilidade e o custo associado. Em seguida o algoritmo os classifica para obter o

gráfico desejado. Por outro lado, quando o número de falhas cresce, este tipo de algoritmo se torna inviável.

O número de combinações possíveis de falha para  $k$  falhas distintas em um mês pode ser calculado pela seguinte expressão na notação binomial:

$$\binom{m}{k} = \frac{m!}{k!(m-k)!} \quad (43)$$

onde  $k$  e  $m$  foram definidos acima.

Ora, o número de combinações possíveis para o estudo, e assim, para cálculo do algoritmo, é o número total de combinações com  $k$  variando de 0 a  $n$ .

Assim:

$$C_m = \sum_{k=0}^m \binom{m}{k} \quad (44)$$

onde  $C_m$  é o número total de combinações de falhas ocorrendo em um mês

Ora, o teorema binomial é dado por (MEYER, 1983):

$$(a+b)^m = \sum_{k=0}^m \binom{m}{k} a^k b^{m-k} \quad (45)$$

Assim, se quiséssemos calcular a expressão  $(1+1)^m$ , a expressão a

utilizar seria:

$$2^m = \sum_{k=0}^m \binom{m}{k} \quad (46)$$

Portanto, comparando-se as eq.(46) e eq.(44), obtêm-se:

$$C_m = 2^m \quad (47)$$

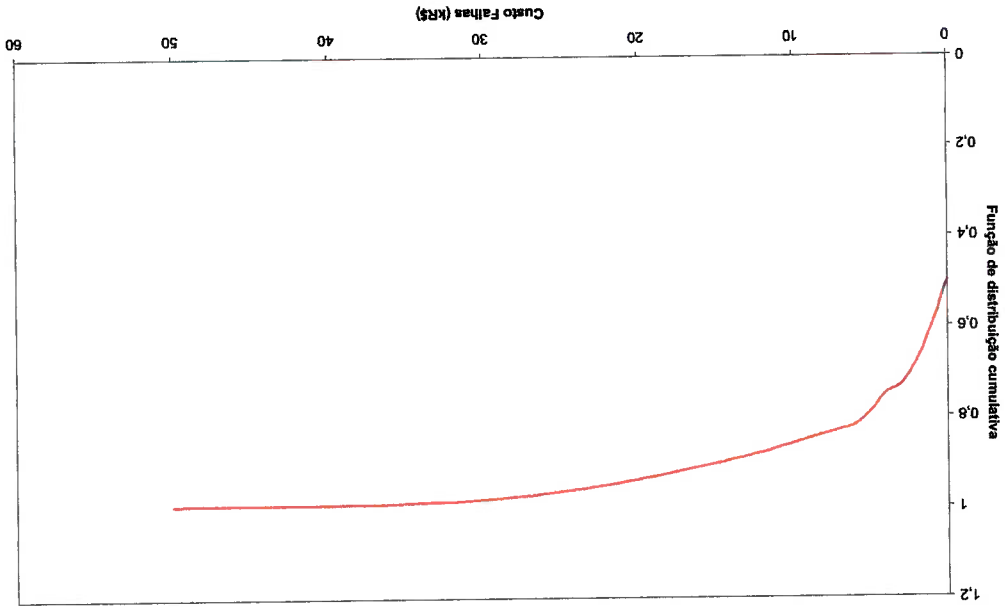
Por exemplo, vamos considerar que um estudo encontra 100 modos de falhas independentes, o que não é muito para a maioria dos estudos reais. O número de combinações possível pode ser calculado por:

$$C_{100}^{30} = 2^{100} = 1,27 \times 10^{30} \quad (48)$$

Este número demonstra o nível de processamento e memória necessários para determinar o gráfico desejado utilizando um algoritmo convencional. Uma possível solução para este problema é de utilizar um algoritmo do tipo convencional que não analise todas as combinações possíveis. Este algoritmo poderia, trabalhando de forma sequencial, analisar todas as combinações com nenhuma falha, com uma falha, duas falhas e assim sucessivamente, até se alcançar um número de eventos representativo. Este número de eventos representativo poderia ser avaliado quando a soma das probabilidades das combinações estudadas for igual a algum valor pré-definido, como por exemplo 0,8. Em situações reais, espera-se que uma instalação, ou ao menos um componente, seja capaz de funcionar por mais de um mês, e é, portanto, normal esperar que a probabilidade de falha seja sempre menor que a probabilidade de não ocorrer a falha. Assim, ao se fazer uma análise sequencial a partir de 0 falhas e aumentando o número de falhas em um mesmo mês, consegue-se avaliar 80% das probabilidades de falhas ao se estudar um número muito menor de combinações de falhas.

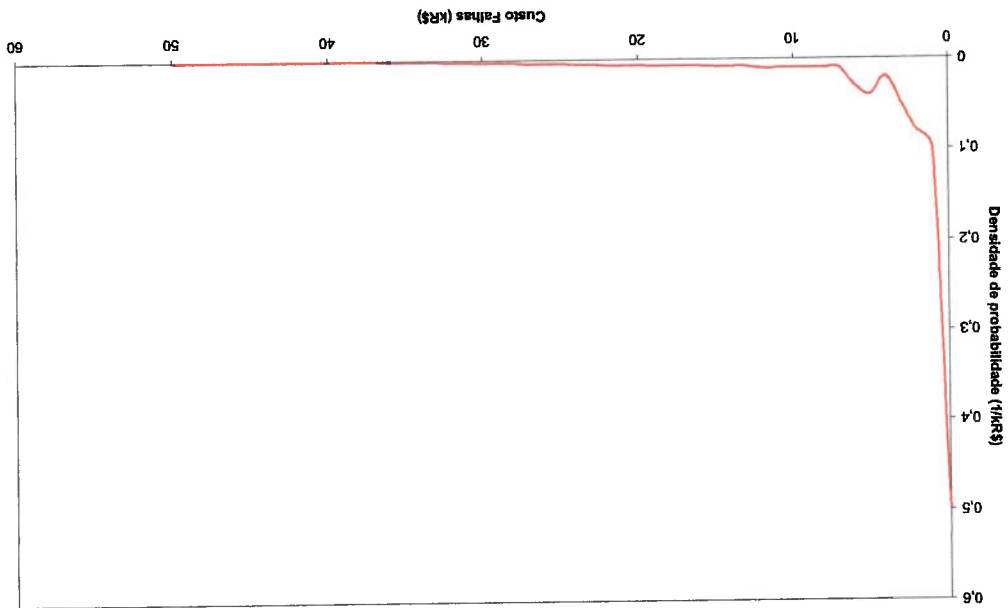
A figura 26 mostra um gráfico construído a partir de alguns poucos dados da instalação de malaxagem. Este exemplifica uma situação real em que poucas falhas, portanto, um baixo custo das falhas no mês, têm maior probabilidade de ocorrer. Definiu-se o eixo das ordenadas com unidade 1/KR\$ para representar uma densidade.

Figura 27 - Função de distribuição cumulativa por custo



A integração do gráfico da figura 26 é representada na figura 27. Neste gráfico é possível verificar que a probabilidade das combinações de falhas terem custo menor do que R\$ 15.000,00 no mês é de cerca de 90%.

Figura 26 - Função densidade de probabilidade por custo



O maior benefício está porém na formação tanto do pessoal da manutenção como dos engenheiros de processo e indiretamente, toda a estrutura hierárquica de produção, nos conceitos e fundamentos da confiabilidade. Toda a empresa, em sua área de produção, está desenvolvendo aos poucos a intuição de confiabilidade, conhecendo como avaliá-la, qual sua importância e aprendendo a identificar quais são os fatores que causam maior impacto sobre esta. O fato de

quando identificadas. Ao longo deste estudo, os modos de falha identificados estão progressivamente sendo utilizados como base de reorganização do banco de dados existente assim como para formação do histórico futuro. Melhorias claras, como aquelas identificadas no campo de recomendação imediata, ou eventualmente correções de falhas conceituais do sistema estão sendo executadas imediatamente

resultado quantitativo final das simulações de custos e confiabilidade. deste trabalho, os resultados esperados neste estudo não se referem apenas ao trabalho ainda estava em andamento. Por outro lado, conforme discutido ao longo que, pelos motivos apresentados no capítulo 5.3, após 8 meses, em abril de 2004, o Os resultados finais do estudo ainda não podem ser analisados já

## 5.4 - RESULTADOS DO ESTUDO

de combinações que já foram processadas. resultado neste caso, o algoritmo deve funcionar de forma a não permitir a repetição necessidade de armazenar cada resultado de combinação. Para obter-se um bom e armazenando-se apenas esta soma associada a esta faixa, consegue-se eliminar a combinações cujos custos estiverem, por exemplo, entre R\$ 1.000,00 e R\$ 2.000,00, resultados em faixas de custos. Assim, somando-se as probabilidades de todas (mas não de processamento), este pode, ao longo do processamento, agrupar os Para reduzir ainda mais a necessidade de memória do algoritmo abrangem a maior probabilidade de ocorrências. concentre em calcular os casos com poucas falhas em um mesmo mês consegue Este exemplo deixa portanto claro que um algoritmo que se

existir um grupo de trabalho estudando este assunto já causa curiosidade suficiente para gerar uma reflexão de todos os níveis estratégicos sobre os possíveis benefícios deste enfoque. Esta ocorrendo uma guinada gradual para a confiabilidade na produção, assim como ocorreu a guinada para a qualidade no início dos anos 90.



Este trabalho, motivado pela atual discussão efervescente e pela exigência de aplicações de técnicas de confiabilidade na área de manutenção industrial, buscou, desde o princípio, reforçar os conceitos e definições e, portanto, as bases necessárias para a realização de qualquer estudo de confiabilidade ou análise de riscos. Buscou-se apresentar as principais grandezas envolvidas com este estudo assim como os conceitos e tipos de falhas que podem ser encontradas em análises de sistemas de produção. Foram apresentadas algumas das principais ferramentas de análise disponíveis e atualmente em uso no mercado. Estas não foram sugeridas como técnicas de aplicação imediata, porém como referência de idéias de diferentes possibilidades de abordagem de estudos de avaliação de confiabilidade ou análise de riscos, ressaltando as aplicações de cada ferramenta em diferentes áreas ou fases do estudo. Discutiu-se então a presença e necessidade deste tipo de estudo na indústria, em sua gestão diária de produção e busca por melhorias, distinguindo sua aplicação na área de manutenção das outras áreas envolvidas na produção. Na área de manutenção apresentou-se um breve histórico estabelecendo a forma como a confiabilidade ganhou força e importância na indústria e ilustrando com referências de aplicação de técnicas voltadas para ganhos nesta área. A partir de então, a discussão se estendeu para as outras áreas da produção, procurando demonstrar a importância da formação e do envolvimento de todos os responsáveis pela gestão industrial diária com a noção de confiabilidade e a análise de riscos. Foi apresentado um exemplo prático de estudo completo de confiabilidade e análise de riscos, voltado para a área de manutenção, visando não apenas redução de falhas e nem apenas redução de custos, porém, avaliando também impactos e efeitos sobre a gestão ambiental, de segurança do trabalho e das instalações, conforme resumido nas tabelas apresentadas no anexo.

Através das referências consultadas procurou-se estender os conceitos estudados desde a indústria de processos tradicionais de pequeno e médio porte até a indústria de exploração de petróleo, passando pela indústria naval.

## 6 - CONCLUSÕES

Buscou-se mostrar ao longo deste trabalho que, em geral, qualquer estudo de confiabilidade pode servir como base para uma reestruturação dos bancos de dados e históricos, melhorando assim a eficiência no uso do banco de dados.

Sugeriu-se que em estudos de confiabilidade seja avaliada a possibilidade de determinação de uma sistemática para análise de riscos avaliando portanto os impactos de um estudo de confiabilidade em termos de outras grandezas. Estas outras grandezas podem ser mais representativas em termos de avaliação da gestão, das políticas e dos planos de manutenção. Apresentou-se no exemplo uma aplicação onde os objetivos da análise de riscos foram estabelecidos pelos custos de operação. Tal aplicação pode, por exemplo, ser utilizada como trunfo em negociações de contratos de seguros, que baseiam os custos de franquias e prêmios em riscos e custos envolvidos com falhas e paradas de produção associadas a estas. Sugere-se, para trabalhos futuros, o desenvolvimento de um algoritmo eficiente e completo para construção dos gráficos, cálculos e análise de riscos conforme apresentado no capítulo 5.3.

Através deste trabalho buscou-se sugerir a não utilização imediata das ferramentas de estudo disponíveis no mercado. Assim como ocorreu na época da disseminação das normas e certificações de qualidade, gestão ambiental e de segurança, além de outras ferramentas como 5S, a aplicação de métodos sistemáticos e padronizados de forma indiscriminada não alcança os objetivos finais esperados que se baseiam sempre em uma mudança da cultura organizacional. É portanto necessário formar uma cultura de busca de confiabilidade nas organizações. É importante formar todos os envolvidos, com maior ou menor profundidade, para criar a consciência, mesmo que intuitiva, e a capacidade de análise de aspectos que afetam a confiabilidade. Deve-se, portanto, buscar sempre formas de desenvolver a formação dos envolvidos para incorporar a confiabilidade e o gerenciamento de riscos no dia a dia das empresas. Sugere-se, portanto, que em um trabalho futuro, seja efetuada a avaliação qualitativa e quantitativa dos impactos da confiabilidade humana na operação de instalações industriais sobre os indicadores de manutenção. O estudo poderia também buscar avaliar como melhorar estes indicadores através de ações na capacitação da mão de obra de operação, ou de melhoria da instalação.

## **ANEXO 1 – DEFINIÇÃO DO SISTEMA, SUBSISTEMAS E COMPONENTES**

Sistema

MALAXADOR

Sub-Sistema

Malaxador

Acionamento

Lubrificação

Unid. Hidráulica

Proteção e Controle

Aquecimento e Resfriamento MLX

Componentes

- Caixa Engrenagens
- Rotores
- Sist. Selagem da caixa de engrenagens
- Sist. Selagem do MLX (Viscoseal)
- Corpo do MLX
- Mancal dianteiro do MLX
- Pistão do orifício
- Pistão de abertura
- Pistões de trava (2)
- Pistão de giro da câmara
- Termopar do orifício
- Indicador de curso do orifício

- Motor
- Positron
- Lub. Positron
- Refr. Positron
- Lub. Redutor
- Redutor
- Acoplamento
- Ventilador
- Serpentina

- Bomba Alim.
- Bomba retorno
- Tubulação
- Reservatório
- Trocador
- Filtro tela alim.
- Distribuidor
- 2 fluxostatos
- termostato
- pressostato
- FI
- Filtro Y retorno

- Reservatório
- Bomba
- Válv. Direcional
- 2 pressostatos
- Acumulador Hid.
- PSV's
- Chaves de comando
- Trocador
- Tubulação
- Distribuição
- Válv. Bloqueio

- Painel de Acionamento MT
- Tacogerador
- Termostato positron
- CLP / Supervisor
- Controle abertura orif.
- Fim de curso abertura
- Painel do positron

- Tubulação
- Válv. Bloqueio

## **ANEXO 2 – DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES E FALHAS FUNCIONAIS**

MALIXADOR

Funções	I - Transformar PE em pó (finir + abitar) em PE fundido c/ produtividade horaria minima de 4/h, dentro de 1h, incluindo p/ cada resma, em regime de trabalho 24 h/dia.	II - Malaxar sem perda de produto fundido (sem Viscosão)	III - Malaxar sem perda de produto em pó	IV - Malaxar sem deteriorar a pasta	V - Malaxar com contaminação da pasta	VI - Malaxar com segurança pessoal e ambiental e sem deteriorar o produto	VII - Garantir que o sistema esteja funcionando em caso de emergência	VIII - Sinalizar quando as condições normais de funcionamento	IX - Permitir que sejam feitas manutenções quando necessário (manutenibilidade)	X - Permitir a partida do MLX quando necessário					
Falha funcional	A - Manter da transformadora PE em pó em produto fundido	B - Transformar e acabar com produtividade menor que 4/h	C - Não garantir o ML de trabalho	D - Não ser capaz de trabalhar 24 h/dia	A - Malaxar com perda de produto	A - Malaxar deteriorando a pasta	A - Malaxar com contaminação da pasta	A - Malaxar comprometendo a segurança	B - Malaxar comprometendo o ML de trabalho	C - Desligar sem sinalizar	A - Não sinalizar	B - Sinalizar errado	A - Dificultar a manutenção	A - Não permitir a partida	B - Partir quando não for necessário

## **ANEXO 3 – DEFINIÇÃO DOS MODOS E EFEITOS DE FALHA**





**ANEXO 4 – PLANILHA DE ANÁLISE DA SITUAÇÃO  
ATUAL**

Descrição	Realizado por					Revisado por		Data			
	Malaxador					B.JJ (SLV), Gustavo, Alexandra, Helder, Sergio (Todos ABB)		12/08/2003			
ID	MTBF (meses)	MTTR (horas)	M.A. (S/N)	Seg. (S/N)	Custo Qual. (R\$)	Custo Reparo (R\$)	Outros Custos (R\$)	Custo Total (R\$)	Confiabilidade de falha no mês	Probabilidade de falha no mês	Custo Médio da Falha (R\$/mês)
IA1								R\$ 0,00			
IA2								R\$ 0,00			
IA3								R\$ 0,00			
IA4								R\$ 0,00			
IA5								R\$ 0,00			
IA6								R\$ 0,00			
IA7								R\$ 0,00			
IA8								R\$ 0,00			
IA9								R\$ 0,00			
IA10								R\$ 0,00			
IA11								R\$ 0,00			
IA12								R\$ 0,00			
IA13								R\$ 0,00			
IA14								R\$ 0,00			
IA15								R\$ 0,00			
IA16								R\$ 0,00			
IA17								R\$ 0,00			
IA18								R\$ 0,00			
IA19								R\$ 0,00			
IA20								R\$ 0,00			
IA21								R\$ 0,00			
IA22								R\$ 0,00			
IA23								R\$ 0,00			
IA24								R\$ 0,00			
IA25								R\$ 0,00			
IA26								R\$ 0,00			
IA27								R\$ 0,00			
IA28								R\$ 0,00			
IA29								R\$ 0,00			
IA30								R\$ 0,00			
IA31								R\$ 0,00			
IA32								R\$ 0,00			
SISTEMA			N	N				R\$ 0,00			0,00

**ANEXO 5 – PLANILHA DE ANÁLISE DA SITUAÇÃO  
ATUAL SEM PLANOS DE MANUTENÇÃO  
PREVENTIVA**



**ANEXO 6 – PLANILHA DE ANÁLISE DA SITUAÇÃO  
APÓS IMPLANTAÇÃO DE MODIFICAÇÕES E  
PLANOS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA  
SUGERIDOS**

Descrição		Realizado por						Revisado por		Data			
Malaxador		BUJ (SLV), Gustavo, Alexandra, Helder, Sergio (Todos ABB)								12/08/2003			
ID	MTBF(1) (meses)	MTTR(1) (horas)	M.A.(1) (S/N)	Seg.(1) (S/N)	Custo Qual.(1) (R\$)	Custo Reparo (1) (R\$)	Outros Custos (1) (R\$)	Custo Total (1) (R\$)	Contabilidade de falha no mês	Probabilidade de falha no mês	Custo Médio da Falha (R\$/mês)	Custo Plano (R\$/mês)	(Custo / Benefício) < 1 ? (S/N)
IA1								R\$ 0,00					
IA2								R\$ 0,00					
IA3								R\$ 0,00					
IA4								R\$ 0,00					
IA5								R\$ 0,00					
IA6								R\$ 0,00					
IA7								R\$ 0,00					
IA8								R\$ 0,00					
IA9								R\$ 0,00					
IA10								R\$ 0,00					
IA11								R\$ 0,00					
IA12								R\$ 0,00					
IA13								R\$ 0,00					
IA14								R\$ 0,00					
IA15								R\$ 0,00					
IA16								R\$ 0,00					
IA17								R\$ 0,00					
IA18								R\$ 0,00					
IA19								R\$ 0,00					
IA20								R\$ 0,00					
IA21								R\$ 0,00					
IA22								R\$ 0,00					
IA23								R\$ 0,00					
IA24								R\$ 0,00					
IA25								R\$ 0,00					
IA26								R\$ 0,00					
IA27								R\$ 0,00					
IA28								R\$ 0,00					
IA29								R\$ 0,00					
IA30								R\$ 0,00					
IA31								R\$ 0,00					
IA32								R\$ 0,00					
SISTEMA			N	N							0,00	R\$ 0,00	

## REFERÊNCIAS

- CARVALHO, L. T. **Planejamento Estratégico da Manutenção**: Apostila do Curso de Pós-Graduação em Gerenciamento da Manutenção. São Paulo: Instituto de Especialização em Ciências Administrativas e Tecnológicas da Faculdade de Engenharia Industrial, 2003.
- CRAWLEY, F.; MALCOLM, P.; TYLER, B. **HAZOP**: Guide to Best Practice. Rugby: Institution of Chemical Engineers, 1999
- DEGROOT, M.H. **Probability and Statistics**. Pittsburgh: Addison-Wesley, 1984
- DE LEÓN, D.; HEREDIA-ZAVONI, E. Probability Distributions of Mechanical Damage for Offshore Marine Platforms. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE (ISOPPE-2001), 11., Stavanger, 2001. **Proceedings of the Eleventh (2001) International Offshore and Polar Engineering Conference**. Stavanger: Omnipress, 2001. 1 CD-ROM.
- DUANE, J.T. Learning Curve Approach to Reliability Monitoring. **IEEE Transactions on Aerospace**, v.2, p.563, 1965
- GAMBIRASIO JUNIOR, L. **Controle da Manutenção**: Apostila do Curso de Pós-Graduação em Gerenciamento da Manutenção. São Paulo: Instituto de Especialização em Ciências Administrativas e Tecnológicas da Faculdade de Engenharia Industrial, 2003.
- GAMBIRASIO JUNIOR, L. **Execução da Manutenção**: Apostila do Curso de Pós-Graduação em Gerenciamento da Manutenção. São Paulo: Instituto de Especialização em Ciências Administrativas e Tecnológicas da Faculdade de Engenharia Industrial, 2003.

KUO, C. Safety of Offshore Installations – Making ALARP Principle More Practicable. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR

2000), Rio de Janeiro: Mundo Virtual, 2000. 1 CD-ROM.  
Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore (SOBENA 18., Rio de Janeiro, 2000. Anais do 18º Congresso Nacional de MARÍTIMOS, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE (SOBENA 2000), de Sistemas Complexos. In: CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTES KAWANO, A.; MORISHITA, H.M.; MÔNACO, F.A. Cálculo da Disponibilidade

ROM.  
Artic Engineering (OMAE-2001), Rio de Janeiro: Sonopress, 2001. 1 CD- Proceedings of the 20<sup>th</sup> (2001) International Conference on Offshore and AND ARTIC ENGINEERING (OMAE-2001), 20., Rio de Janeiro, 2001. Blowout Preventers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE JORGE, N.M.; WOLFRAM, J.; CLARK, P. Reliability Assessment of Subsea

Stavanger: Omnipress, 2001. 1 CD-ROM.  
Eleventh (2001) International Offshore and Polar Engineering Conference. CONFERENCE (ISOP-2001), 11., Stavanger, 2001. Proceedings of the System. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING HAVER, S.; LARSEN, K.; MELING, T.S. Reliability Assessment of a Mooring

Paulo: Ieditora, 2003.  
GUMARÃES, L.S. Gerenciamento de Riscos e Segurança de Sistemas. São

Engineering (OMAE-2001), Rio de Janeiro: Sonopress, 2001. 1 CD-ROM.  
the 20<sup>th</sup> (2001) International Conference on Offshore and Artic ENGINEERING (OMAE-2001), 20., Rio de Janeiro, 2001. Proceedings of INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE AND ARTIC Offshore Structures and in Marine Operations Projects. In: GUDMESTAD, O.T. Risk Assessment Tools for Use During Fabrication of



- ENGINEERING CONFERENCE (ISOPE-2001), 11, Stavanger, 2001. Proceedings of the Eleventh (2001) International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger: Omnipress, 2001. 1 CD-ROM.
- LAPIN, L.T. **Probability and Statistics for Modern Engineering**. Belmont: Duxbury Press, 1990.
- LEITCH, R.D. **Reliability Analysis for Engineers**. Oxford: Oxford Science Publications, 1995.
- LEWIS, E.E. **Introduction to Reliability Engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1987.
- MELCHERS, R.E. Probabilistic Models of Corrosion for Reliability Assessment and Maintenance Planning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE AND ARTIC ENGINEERING (OMAE-2001), 20., Rio de Janeiro, 2001. Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Offshore and Artic Engineering (OMAE-2001), Rio de Janeiro: Sonopress, 2001. 1 CD-ROM.
- MEYER, P. L. **Probabilidade: Aplicações à Estatística**. 2.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1983.
- MODARRES, M. **What Every Engineer Should Know About Reliability and Risk Analysis**. New York: Marcel Dekker Inc., 1993.
- MORANDI, A. Application of Reliability-Based Techniques to Mobile Drilling Units. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE AND ARTIC ENGINEERING (OMAE-2001), 20., Rio de Janeiro, 2001. Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Offshore and Artic Engineering (OMAE-2001), Rio de Janeiro: Sonopress, 2001. 1 CD-ROM.

- MOUBRAY, J. **Reliability-Centred Maintenance**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.
- NOWLAN, F.S.; HEAP, H.F. **Reliability-Centred Maintenance**. Washington: Department of Defense, 1978.
- OLIVEIRA, L.F.S. et al. Reliability Analysis of the Template Manifold OCTOS-1000. In: SAFETY AND RELIABILITY SOCIETY SIMPOSIUM (SARSS '91), Coldfield, 1991. **Offshore Safety and Reliability**. New York: Elsevier Applied Science, 1991.
- OREDA-92: Offshore Reliability Data Handbook. Hovik: OREDA Participants & Det Norske Veritas, 1992.
- PAPULIS, A. **Probability, Random Variables, and Stochastic Processes**. New York: McGraw-Hill, 1984.
- PILLAY, A. et al. Modified FMEA for Fishing Vessels: A Fuzzy Set and Grey Theory Approach. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE (ISOPF-2001), 11., Stavanger, 2001. **Proceedings of the Eleventh (2001) International Offshore and Polar Engineering Conference**. Stavanger: Omnipress, 2001. 1 CD-ROM.
- RAJAGOPALAN, K. Reliability Study of Ship Hull Structures Using Fuzzy Variables. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE AND ARTIC ENGINEERING (OMAE-2001), 20., Rio de Janeiro, 2001. **Proceedings of the 20<sup>th</sup> (2001) International Conference on Offshore and Artic Engineering (OMAE-2001)**, Rio de Janeiro: Sonopress, 2001. 1 CD-ROM.

- SIQUEIRA, K.T. RCM: Apostila do Curso de Pós-Graduação em Gerenciamento da Manutenção. São Paulo: Instituto de Especialização em Ciências Administrativas e Tecnológicas da Faculdade de Engenharia Industrial, 2003.
- SILVEIRA, Z.C.; CAVALCA, K.L. Development of a Robust Reliability Methodology to Mechanical Systems Parameter Fitting. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE AND ARTIC ENGINEERING (OMAE-2001), 20., Rio de Janeiro, 2001. Proceedings of the 20<sup>th</sup> (2001) International Conference on Offshore and Artic Engineering (OMAE-2001), Rio de Janeiro: Sonopress, 2001. 1 CD-ROM.
- SUNDARARAJAN, C. Guide to Reliability Engineering: Data, Analysis, Applications, Implementation, and Management. New York: Van Nostrand Reinhold 1991.
- WOLFRAM, J.; OWEN, G.D. Education and Training for Safety and Reliability in the Offshore Industry. In: SAFETY AND RELIABILITY SOCIETY SIMPOSIUM (SARSS '91), Coldfield, 1991. Offshore Safety and Reliability. New York: Elsevier Applied Science, 1991.