

Rafael Monteiro Veras

**UMA SISTEMÁTICA PARA ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO DE  
SISTEMAS TÉCNICOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Acires Dias, Dr. Eng.

Florianópolis  
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária  
da UFSC.

Veras, Rafael Monteiro

Uma sistemática para análise de degradação de sistemas  
técnicos / Rafael Monteiro Veras ; orientador, Acires Dias  
- Florianópolis, SC, 2016.  
193 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Análise de falha. 3. Projeto  
para Manutenibilidade. 4. Gestão de Manutenção. I. Dias,  
Acires. II. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Rafael Monteiro Veras

## **UMA SISTEMÁTICA PARA ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO DE SISTEMAS TÉCNICOS**

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

Florianópolis, 06 de dezembro de 2016.

---

Prof. Jonny Carlos da Silva., Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

---

Prof. Acires Dias, Dr. Eng. – Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

### **Banca Examinadora:**

---

Prof. André Ogliari, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Rodrigo Vieira, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Yesid Asaff, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina



*A toda minha família e amigos*



## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ariosto e Maria do Rosário, por serem os maiores incentivadores para eu trilhar pelo caminho que escolhi, e sobretudo pelo amor, carinho que sempre me proporcionaram.

Aos meus irmãos, Felipe e Vítor, por sempre estarem ao meu lado, com sua irmandade e companheirismo.

Aos meus avós, Silvério e Maria Dalva, pelo amor e exemplos de pessoas que são.

Ao Prof. Acires Dias, pela orientação desafiadora e o maior responsável pela transformação pessoal e profissional por qual passei no desenvolvimento deste trabalho, e uma amizade que sempre a levarei com carinho.

A todos meus amigos do NeDIP que por demais contribuíram para este trabalho e, especialmente, por me proporcionarem momentos memoráveis durante esse período.

Aos meus amigos, Cairé Barreto, Thiago Alencar, Natalia Boelter e Augusto Parigot pelo apoio e incentivo.

Um agradecimento especial aos meus amigos-irmãos, Pedro Romio e Guilherme Loureiro, por incentivo, confiança, paciência e por me acolherem desde o momento que cheguei à Florianópolis.

A todos meus familiares pela torcida e pelo incentivo recebido e, principalmente, e pelo acolhimento e carinho nos momentos que passei em Teresina.

Aos trabalhadores brasileiros que, através de seus impostos, proporcionaram o Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico (CNPq) fornecer o auxílio financeiro recebido na forma de bolsa de mestrado.

Em suma, a todos que diretamente ou indiretamente contribuíram de alguma forma neste trabalho.



*“Lord, we ain’t what we ought a be.  
We ain’t what we want to be.  
We ain’t what we going to be.  
But, thank God, we ain’t what we wuz.”*  
(Martin Luther King Jr.)



## RESUMO

Todo produto ou sistema não está livre de falhas. De modo geral, é esperado que o sistema se degrade com o passar do tempo, logo é provável que o mesmo tenha as condições funcionais afetadas por algum processo de degradação. Percebe-se que as falhas, salvo alguns casos, não acontecem de maneira abrupta, mas sim perpassam por estados que podem produzir efeitos no sistema, tais como: aumento de vibração, temperatura, ruído, folgas, interrupção da função e entre outros. Estes efeitos trazem informações sobre os processos de degradação e podem ser utilizados como referenciais para tomadas de decisão, tanto para questões operacionais e de manutenção quanto para questões de projeto do sistema. É a partir da análise de falha em componentes, subsistemas ou sistemas técnicos, que se conhece o processo de falha (mecanismos, modos de falha, causas e efeitos) e se é capaz de sistematizar estas tomadas de decisão. Dentro deste contexto, este trabalho aborda o desenvolvimento de uma sistemática para organizar, analisar e caracterizar o processo de degradação em sistemas técnicos. O intuito foi construir procedimentos a partir de técnicas que ajude o entendimento da degradação, facilite a aplicação e organize as informações para tomada de decisão em nível de projeto ou de manutenção. Fez-se uma aplicação em sistemas hidráulicos para testar a abordagem proposta. Com os resultados obtidos, foi possível constatar que a abordagem desenvolvida ajuda na estruturação e documentação das informações acerca do processo de degradação de sistemas técnicos com vistas a auxiliar os projetistas na incorporação de barreiras para mitigar os processos de falhas e também os manutenibilistas nas ações de manutenibilidade, principalmente em nível do planejamento das manutenções preventivas e preditivas.

**Palavras-chave:** Processos de Degradação, Análise de Falha, Sistemática, Projeto para Manutenibilidade, Ciclo de vida.



## ABSTRACT

Every product or system is not fault-free. In general, it is expected that the system degrades with time, so it is likely that the functional conditions of the system will be affected by some degradation process. It is notable, that the failures, except for some cases, do not happen abruptly, but cut across by several states that produce various effects on the system, such as increasing vibration, temperature, noise and others. These effects may be used as points for decision making for operational, maintenance and system design issues. Through the failure analysis of components, subsystems or technical systems it is possible to know the process of failure (mechanisms, failure modes, causes and effects) and to systematize the decision-making. Within this context, this dissertation addresses the development of a systematic to organize, analyze and characterize the degradation process in technical systems. The aim was to create procedures based on techniques that provide the understanding of the degradation, facilitate the application and organize the information for decision making on the design or maintenance level. An application was made to verify the proposed systematic. With the results, one can see that the developed systematic helps to structure and document the information about technical systems degradation process serving as a basis for the designer on the incorporation of barriers to mitigate the failure's process and the maintenance staff in their action, mainly in the level of the planning of preventive and predictive maintenance.

**Keywords:** Degradation process, Failure Analysis, Systematic, Design for Maintainability, Life cycle.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Curva da taxa de falha para sistemas elétricos ou eletrônicos.....	30
Figura 1.2 - Curva da taxa de falha para sistemas mecânicos.....	31
Figura 1.3 - Modelo markoviano para com dois estados para sistemas reparáveis .....	31
Figura 1.4 – Modelo markoviano com a abordagem multiestado para falha de sistema .....	32
Figura 1.5 - Exemplo de degradação de um sistema mecânico.....	33
Figura 1.6 - Representação do desempenho em função das regiões de operação do sistema .....	34
Figura 1.7 - Influência do processo de degradação no desempenho do sistema	35
Figura 1.8 - Etapas da pesquisa.....	37
Figura 2.1 - Probabilidade de falha sob o ponto de vista de resistência mecânica do material .....	39
Figura 2.2 - Circuito hidráulico: a) Ilustração; b) Diagrama do circuito.....	41
Figura 2.3 - Histograma das frequências de falha e função densidade .....	43
Figura 2.4 - Função densidade de falha .....	44
Figura 2.5 - Relação entre a confiabilidade e não-confiabilidade .....	44
Figura 2.6 - Desdobramento da função global na estrutura funcional do sistema .....	51
Figura 2.7 - Exemplo de tabela de FMEA/FMECA.....	52
Figura 2.8 – Exemplo de estrutura do FTA .....	54
Figura 2.9 - Estrutura da técnica CNEA .....	57
Figura 2.10 - Sistema com dois estados de falha .....	58
Figura 3.1- Causa raiz de uma falha de um subsistema de lubrificação.....	63
Figura 3.2 - Degradação de dois sistemas idênticos com desempenhos desejados diferentes .....	69
Figura 3.3 - Avanço da falha em um sistema técnico .....	70
Figura 4.1- Relação da SisAD com modelo PRODIP e o uso .....	77
Figura 4.2 - Modelo de referência para cada etapa utilizado para orientar as etapas da SisAD.....	78
Figura 4.3 - Sistemática para análise de degradação de sistemas técnicos.....	79
Figura 4.4 - Interação da SisAD com o ciclo de vida de um sistema técnico ....	83
Figura 4.5 – Interação entre as saídas da SisAD e o modelo PRODIP .....	84
Figura 4.6 - Etapa de Caracterização do sistema técnico .....	85
Figura 4.7 - Etapa de Caracterização dos cenários de falhas .....	89
Figura 4.8 - Análise dos resultados.....	91
Figura 5.1 - Interação do Sistema de Bombeamento com a SisAD .....	99
Figura 5.2 - Etapa 1: entrada das informações do SB e saída do SB caracterizado .....	100
Figura 5.3 - Atividade 1.1: identificação dos subsistemas e componentes do SB por meio das informações coletadas no OREDA (2002).....	100
Figura 5.4 - Atividade 1.2: identificação das funções dos subsistemas do SB a partir do Quadro 5.2.....	102

Figura 5.5 - Atividade 1.3: Relacionamento entre o fluxo de energia, material e sinal entre as funções dos subsistemas identificados para o SB. ....	103
Figura 5.6 - Etapa 2: caracterização dos cenários de falhas do SB por meio do documento de caracterização do SB .....	105
Figura 5.7 - Atividade 2.1: dados das taxas de falhas e das porcentagens de falha para o SB obtidos a partir do documento D6 e das informações coletadas.....	106
Figura 5.8 - Atividade 2.2: tratamentos dos dados obtidos pela Atividade 2.1 para o SB .....	106
Figura 5.9 - Porcentagem de falhas por subsistema.....	107
Figura 5.10 - Atividade 2.3: curvas de probabilidade acumulada de falha para os subsistemas estimada por meio das taxas de falhas calculadas na atividade 2.2 .....	110
Figura 5.11 - Atividade 2.4: priorização dos subsistemas do SB a partir das curvas de probabilidade de falha e das informações obtidas das atividades anteriores .....	114
Figura 5.12 - Atividade 2.5: identificação dos modos de falhas para subsistemas críticos .....	115
Figura 5.13 - Atividade 2.6: identificação das causas e efeitos para o modo de falha funcional identificado para cada subsistema crítico.....	116
Figura 5.14 - Atividade 2.7: representação dos cenários de falhas para os subsistemas críticos .....	118
Figura 5.15 - FTA para o Subsistema de Lubrificação .....	121
Figura 5.16 - FTA para o Subsistema Bomba.....	122
Figura 5.17 - Etapa 3: análise dos resultados obtidos pela SisAD para solucionar ou mitigar os problemas causados pelos processos de degradação.....	123
Figura 5.18 - Atividade 3.1: análise dos cenários para identificação dos problemas causados pelos processos de degradação.....	123
Figura 5.19 - Atividade 3.2: busca de soluções para os cenários analisados na Atividade 3.1 .....	128
Figura 5.20 - Atividade 3.3: recomendações para a manutenção baseada nas fontes elencadas na Atividade 3.2 .....	129
Figura 6.1 - Percepção dos processos de degradação ao longo do tempo.....	138
Figura B.1- Tela inicial do software SisAD.....	161
Figura B.2 - Tela SOBRE do software piloto desenvolvido.....	162
Figura B.3 - Layout da tela principal do SisAD.....	163
Figura B.4 - Tela para cadastro de um novo sistema técnico.....	164
Figura B.5 - Tela para cadastro de subsistema técnico .....	164
Figura B.6 - Tela para cadastro de subsistema técnico .....	165
Figura B.7 - Tela acerca das informações cadastradas para um mecanismo ..	166
Figura B.8 - Documento gerado para impressão .....	167
Figura C.1 - Delimitação do Sistema Bombeamento.....	169
Figura D.1 - Cadeia de Markov para o Sistema Bombeamento.....	184
Figura D.2 – Curva de probabilidade para cada estado do Subsistema de Controle e Monitoramento.....	190

Figura D.3 – Curva de probabilidade para cada estado do Subsistema Indefinido.....	190
Figura D.4 – Curva de probabilidade para cada estado do Subsistema Bomba.....	191
Figura D.5 – Curva de probabilidade para cada estado do Subsistema de Lubrificação.....	191
Figura D.6 – Curva de probabilidade para cada estado do Subsistema de Transmissão.....	192
Figura D.7 – Curva de probabilidade para cada estado do Subsistema Miscelânea.....	192



## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Taxas de falhas por tipo de falha .....	108
Tabela 5.2 - Taxa de falha para cada subsistema .....	109
Tabela 5.3 - Probabilidade dos estados para o Subsistema Bomba.....	126
Tabela 5.4 - Probabilidade dos estados para o Subsistema de Lubrificação ....	127
Tabela 5.5 - Resultado da avaliação .....	131
Tabela C.1 - Porcentagem de falha de item manuteníveis por modo de falha .	173
Tabela C.2 - Porcentagem de falhas para Subsistema de Transmissão .....	177
Tabela C.3 - Porcentagem de falhas para Subsistema Miscelânea.....	178
Tabela C.4 - Porcentagem de falhas para Subsistema de Lubrificação.....	179
Tabela C.5 - Porcentagem de falhas para Subsistema de Controle e Monitoramento .....	180
Tabela C.6 - Porcentagem de falhas para Subsistema Bomba .....	181
Tabela C.7 - Porcentagem de falhas para Subsistema Bomba .....	182
Tabela D.1 - Taxas de falhas para cada subsistema.....	187
Tabela D.2 - Valores das constantes de ponderação.....	187
Tabela D.3 - Taxas de transição para cada subsistema.....	187



## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Diferença de abordagem do modo de falha para um eixo-árvore	40
Quadro 2.2 - Formas comuns de distribuição de probabilidade utilizadas para representar as funções densidades de probabilidade de falha	47
Quadro 2.3- Descrição das colunas do FMEA/FMECA	52
Quadro 2.4 - Simbologia de eventos padrão do FTA	54
Quadro 2.5 - Representação de algumas portas lógicas utilizadas no FTA	56
Quadro 2.6 - Quadro das taxas de transição entre estados	59
Quadro 3.1 - Relação entre mecanismos de degradação/modo de falha e causas de falhas/efeito	64
Quadro 3.2 - Mecanismos de degradação: definições e referências	65
Quadro 3.3 - Indicadores de monitoramento da degradação	71
Quadro 3.4 - Exemplos de trabalho sobre processos de degradação	73
Quadro 3.5 - Tipos de abordagem para modelar processos de degradação	75
Quadro 4.1 - Descrição dos documentos recomendados para a SisAD	80
Quadro 4.2 - Formalização do documento de análise funcional e o desdobramento das suas funções	86
Quadro 5.1- Contaminantes de SH e suas consequências	97
Quadro 5.2 – Desdobramento do SB em subsistemas e componentes	101
Quadro 5.3 - Desdobramento do SB em subsistemas e suas funções	102
Quadro 5.4 - Inter-relacionamento entre os subsistemas	104
Quadro 5.5 – Definição dos tipos de falhas para o OREDA (2002)	106
Quadro 5.6 - Curvas de Probabilidade de Falha para cada Subsistema com os dados obtidos nos relatórios do OREDA (2002)	111
Quadro 5.7 - Modo de falha para o Subsistema Bomba e de Lubrificação	115
Quadro 5.8 - FMEA para os subsistemas bomba e de lubrificação	117
Quadro 5.9 - Exemplos de mecanismos e causas de degradação nos subsistemas Bomba e de Lubrificação	124
Quadro 5.10 - Mecanismos e causas de degradação e parâmetros do sistema	124
Quadro 5.11 - Exemplo de recomendação de fontes para consulta de soluções	128
Quadro 5.12 - Exemplo de recomendações para manutenção	130
Quadro C.1 - Divisão do Sistema de Bombeamento em itens manuteníveis	170
Quadro C.2 - Lista de modos de falhas para o OREDA	172



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	<i>American Bureau of Shipping</i>
BTA	<i>Bow-tie Analysis</i>
CNEA	<i>Causal Network Event Analysis</i>
D	Detecção
ETA	<i>Event Tree Analysis</i>
FE	Função elementar
FG	Função global
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
FMECA	<i>Failure Mode, Effects and Criticality Analysis</i>
FP	Função parcial
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
Laship	Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos
MLE	<i>Maximum Likelihood Estimation</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration/ United States of America</i>
NeDIP	Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produto
O	Ocorrência
OREDA	<i>Offshore Reliability Data</i>
PNB	Produto Nacional Bruto
PRODIP	Processo de desenvolvimento integrado de produto
S	Severidade
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SB	Sistema de Bombeamento
SH	Sistema hidráulico
SisAD	Sistemática para Análise de Degradação de Sistemas técnicos
SOD (NPR)	Número de Prioridade de Risco
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina



## LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino:

$A$	[m <sup>2</sup> ]	Área de exposição
$B$	-	Constante de fluência
$CRP$	[g/h]	Perda de espessura de material por unidade de tempo
$D$	[m]	Tamanho médio de partículas
$D_{ab}$	[m]	Profundidade média do desgaste por abrasão
$D_{ad}$	[m]	Profundidade média do desgaste por adesão
$E$	[g/C]	Equivalente eletroquímico
$E$	[N/ m <sup>2</sup> ]	Módulo de elasticidade
$F$	-	Função densidade de falha
$f(\alpha)$	-	Função de ângulo de ataque de partículas
$F$	-	Probabilidade de falha
$k_a$	-	Fator de acabamento superficial
$k_{ab}$	[m <sup>3</sup> /N.m]	Constante de desgaste por abrasão
$k_{ad}$	[m <sup>3</sup> /N.m]	Constante de desgaste por adesão
$k_b$	-	Fator de tamanho ou dimensão
$k_c$	-	Fator de confiabilidade
$k_d$	-	Fator de temperatura
$k_e$	-	Fator de concentração de tensões
$k_f$	-	Fator para efeitos diversos
$L_e$	[m]	Distância total de escorregamento para o desgaste adesivo
$L_s$	[m]	Distância total de escorregamento para o desgaste abrasivo
$M$	[kg]	Perda de massa
$p_m$	[Pa]	Pressão média nominal de contato entre as superfícies
$P_i$	-	Probabilidade de um sistema estar em um estado $i$
$R$	-	Confiabilidade
$SD$	-	Desvio padrão
$S_f$	[MPa]	Limite de resistência a fadiga
$S'_f$	[MPa]	Limite de resistência a fadiga do corpo de prova

$t$	[h]	Tempo
$U_R$	[MPa]	Módulo de Resiliência
$v$	[m/s <sup>2</sup> ]	Velocidade média das partículas
$W$	-	Parâmetro de erosão
$\bar{x}$	-	Média
$X$	-	Conjunto de variáveis randômicas

Alfabeto grego:

$\alpha$	-	Nível de degradação
$\beta$	-	Parâmetro de Forma
$\eta$	[h]	Vida característica
$\gamma$	-	Parâmetro de localização
$\Gamma$	-	Função gama
$\delta$	[m]	Deformação verdadeira por fluência
$\lambda$	[falhas/hora]	Taxa de Falha
$\mu$	[reparos/hora]	Taxa de Reparo
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Massa específica
$\sigma$	[MPa]	Tensão no material
$\sigma_R$	[MPa]	Tensão de ruptura do material

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivação e Justificativa .....</b>	<b>29</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>36</b>
1.2.1	OBJETIVO GERAL .....	36
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	36
<b>1.3</b>	<b>Metodologia da pesquisa.....</b>	<b>37</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho .....</b>	<b>38</b>
<b>2</b>	<b>ABORDAGEM SOBRE FALHAS .....</b>	<b>39</b>
<b>2.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>39</b>
<b>2.2</b>	<b>Definições de falhas .....</b>	<b>40</b>
<b>2.3</b>	<b>Tipos de Falha .....</b>	<b>41</b>
<b>2.4</b>	<b>Quantificação das falhas .....</b>	<b>43</b>
<b>2.5</b>	<b>Técnicas de análise de falhas .....</b>	<b>49</b>
2.5.1	ANÁLISE FUNCIONAL DE PRODUTO.....	50
2.5.2	FMEA/FMECA .....	51
2.5.3	FTA ( <i>FAULT TREE ANALYSIS</i> ).....	53
2.5.4	CNEA ( <i>CAUSAL NETWORK EVENT ANALYSIS</i> ).....	56
2.5.5	CADEIAS DE MARKOV .....	57
<b>2.6</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>60</b>
<b>3</b>	<b>PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO DE SISTEMAS</b>	
<b>TÉCNICOS.....</b>		<b>61</b>
<b>3.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>61</b>
<b>3.2</b>	<b>Definição.....</b>	<b>61</b>
<b>3.3</b>	<b>Mecanismos de degradação .....</b>	<b>62</b>
<b>3.4</b>	<b>Indicadores dos processos de degradação .....</b>	<b>69</b>
<b>3.5</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>75</b>
<b>4</b>	<b>PROPOSTA DA SISTEMÁTICA PARA ANÁLISE DE</b>	
<b>DEGRADAÇÃO DE SISTEMAS TÉCNICOS .....</b>		<b>77</b>
<b>4.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>77</b>
<b>4.2</b>	<b>Sistemática proposta (SisAD).....</b>	<b>77</b>
4.2.1	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA TÉCNICO .....	85
4.2.2	CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS DE FALHAS ...	87
4.2.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	91
<b>4.3</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>92</b>
<b>5</b>	<b>APLICAÇÃO DA SISAD .....</b>	<b>95</b>
<b>5.1</b>	<b>Contextualização da aplicação .....</b>	<b>95</b>
5.1.1	SISTEMAS HIDRÁULICOS .....	95
5.1.2	FALHAS EM SISTEMAS HIDRÁULICOS .....	95

5.1.3	PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO EM SISTEMAS HIDRÁULICOS .....	97
<b>5.2</b>	<b>Estudo de caso: aplicação da SisAD em sistemas hidráulicos .....</b>	<b>98</b>
5.2.1	ETAPA 1: CARCTERIZAÇÃO DO SISTEMA TÉCNICO.....	100
5.2.2	ETAPA 2: CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS DE FALHAS.....	105
5.2.3	ETAPA 3: ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	123
<b>5.3</b>	<b>Avaliação da SisAD.....</b>	<b>131</b>
<b>5.4</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>132</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>135</b>
<b>6.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>135</b>
<b>6.2</b>	<b>Resultado e contribuições.....</b>	<b>136</b>
6.2.1	QUANTO À SISTEMÁTICA DESENVOLVIDA E AO <i>SOFTWARE</i> PROPOSTO.....	136
6.2.2	QUANTO AO ENTENDIMENTO DOS PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO.....	138
6.2.3	QUANTO AOS OBJETIVOS PROPOSTOS.....	139
<b>6.3</b>	<b>Recomendações para trabalhos futuros.....</b>	<b>140</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>143</b>
	<b>APÊNDICE A – TEMPLATES DE DOCUMENTAÇÃO.....</b>	<b>153</b>
	<b>APÊNDICE B – SOFTWARE SISAD.....</b>	<b>161</b>
	<b>APÊNDICE C – TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO .....</b>	<b>169</b>
	<b>APÊNDICE D – MODELAGEM MULTIESTADO PARA O SISTEMA DE BOMBEAMENTO .....</b>	<b>183</b>
	<b>APÊNDICE E – QUESTIONÁRIO.....</b>	<b>193</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação e Justificativa

Kirchsteiger (1999) define sistemas como sendo um agrupamento de elementos que operam em conjunto, relacionando-se, a fim de atingir algum objetivo. O sistema técnico pode, então, ser entendido como um conjunto de equipamentos e instalações que tem uma (ou mais) função para ser desempenhada e, a todo o momento, interage com o ambiente, o homem e outros sistemas técnicos, influenciando e sendo influenciado (CALIL, 2009).

Nenhum sistema técnico é capaz de operar infinitamente sob as condições estabelecidas em projeto. Todo sistema, subsistemas ou componentes envolvidos em um processo estão sujeitos a falhar em algum momento (BELLINI, 2008). Uma vez que a falha venha a acontecer, pode causar danos ao homem, meio-ambiente ou ao próprio sistema técnico.

Tais falhas podem se originar, por exemplo, em erros de projeto, uso incorreto, erro de manufatura, erro de operação, falta de manutenção, entre outras. Portanto, para que um produto seja competitivo, é importante conhecer os detalhes sobre como e o porquê dos sistemas ou componentes empregados em um determinado produto podem vir a falhar (KAGUEIAMA, 2012).

Atualmente, os sistemas técnicos vêm evoluindo de forma a satisfazer as necessidades e requisitos dos mais diversos tipos em decorrência do aumento das exigências de clientes. Isto leva a um desenvolvimento tecnológico o que pode levar ao incremento das fontes de falha (SANABRIA, 2012).

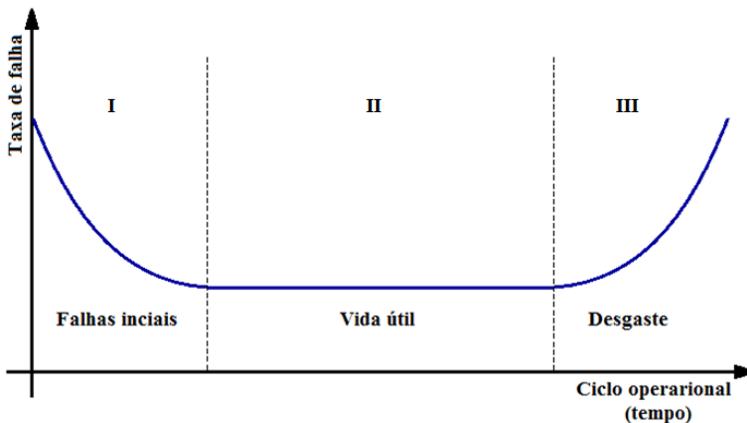
O aumento da complexidade e requisitos de funcionamento requer dos sistemas técnicos um alto grau de confiabilidade. Confiabilidade é a probabilidade de um determinado item desempenhar uma função requerida, sob condições especificadas e durante um dado intervalo de tempo (ABNT, 1994).

A confiabilidade de um sistema ou produto está relacionada com as decisões em nível de projeto e como estas implicam ao longo do ciclo de vida do produto. Todas estas decisões influenciam no custo total do projeto, assim, o desafio encontra-se no equilíbrio entre os custos de um projeto para confiabilidade e as consequências da falta de confiabilidade adequada (MURTHY et al., 2008, p. 6).

Segundo Lafraia (2001) a ocorrência das falhas é categorizada de três maneiras durante o ciclo de vida de um produto/sistema: falhas iniciais (ou vida inicial), falhas aleatórias (ou vida útil) e falhas por desgaste. As falhas iniciais estão associadas a defeitos de fabricação, erros de instalação, manutenção ou de *startup*. As falhas aleatórias estão relacionadas a estresses repentinos, condições extremas, erros humanos ou quaisquer falhas não previsíveis que ocorrem durante a vida útil do produto/sistema. As falhas por desgaste estão ligadas à degradação ocasionada pelo uso do produto/sistema ao longo do ciclo de vida.

As Figura 1.1 mostra a curva da taxa de falha sistemas elétricos ou eletrônicos e a Figura 1.2 para sistemas mecânicos, respectivamente. Observe que o período de vida útil para sistemas mecânicos é curto e logo entram na região de desgaste. Desta maneira, para mantê-los economicamente viáveis se torna necessário fazer manutenções e, assim, os componentes do sistema não entram no estado avançado de desgaste antes deles serem substituídos (BILLINTON, 1992).

Figura 1.1 - Curva da taxa de falha para sistemas elétricos ou eletrônicos

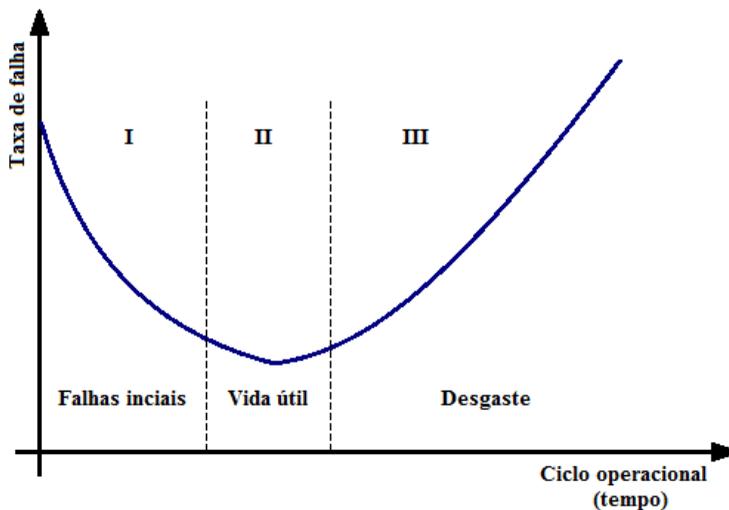


Fonte: Adaptado de Billinton (1992).

Independentemente da região no qual o produto/sistema se encontra, a falha pode ser representada por meio de um modelo markoviano constituído de dois estados: um estado bom ou operacional e outro em falha. Este modelo, indicado na Figura 1.3, representa um sistema reparável com uma taxa transição  $\lambda$  (taxa de falha) entre o estado 0 e o estado 1, e uma taxa de recolocação  $\mu$  por ação da manutenção entre o estado 1 e o estado 0. No entanto, vale ressaltar que, por muitas vezes, existem nos sistemas uma sequência de estados (estados intermediários)

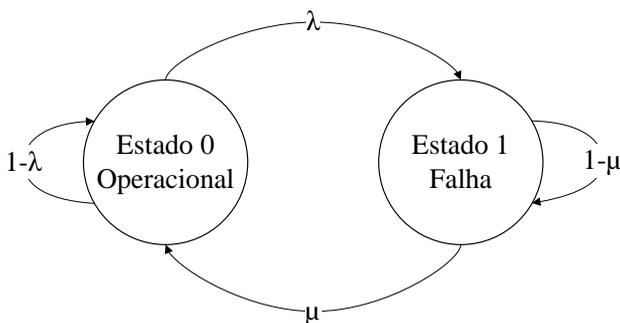
entre o estado operacional (estado 0) e estado de falha (estado 1), bem como os próprios componentes apresentam estes estados intermediários. (JING & YINGKUI, 2012; LISNIANSKI et al., 2010; CASTET, 2012; SAKURADA, 2013).

Figura 1.2 - Curva da taxa de falha para sistemas mecânicos



Fonte: Adaptado de Billinton (1992).

Figura 1.3 - Modelo markoviano para com dois estados para sistemas reparáveis

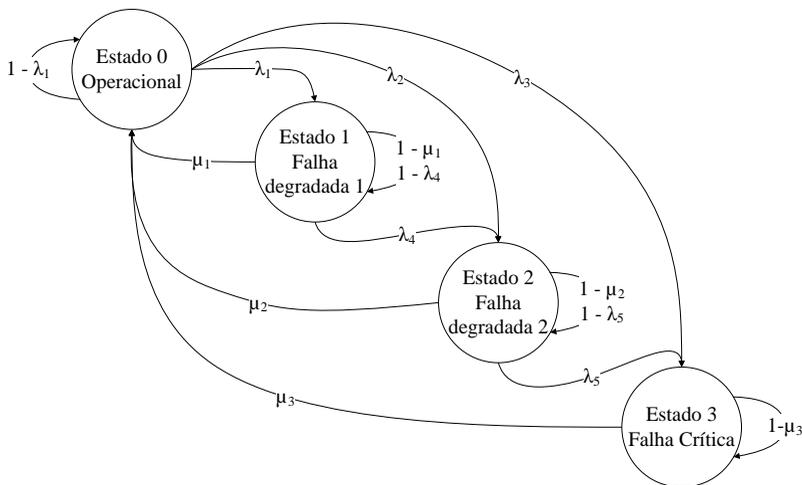


Fonte: Adaptado de Billinton (1992).

Para analisar essa progressão entre o estado operacional e de falha, as referências sugerem uma abordagem multiestados (JING & YINGKUI,

2012; LISNIANSKI et al., 2010; CASTET, 2012). Nessa abordagem, é introduzido o conceito de estados degradados, que são estados intermediários que levam a falha total do sistema. De acordo com Caset (2012), estes estados intermediários conseguem promover uma maior compreensão e resolução dentro da fase de degradação de um item ou sistema. Na Figura 1.4 apresenta-se um exemplo de um modelo markoviano para problemas com mais de um estado, que melhor caracteriza a visão de degradação que se pretende abordar dissertação.

Figura 1.4 – Modelo markoviano com a abordagem multiestado para falha de sistema



Fonte: O autor.

Na Figura 1.4 pode-se perceber que os processos de falhas (ou de degradação) estão associados as transições entre os estados. A taxa de falha  $\lambda_1$ , por exemplo, tem-se um processo de degradação, que se somado a um outro processo leve a  $\lambda_2$ , e que se somado a outro processo chegue a  $\lambda_3$ . Ou seja, o processo de degradação pode estar atrelado ao mesmo mecanismo de falha, ou ser potencializado por um outro que some ao anterior. Também pode ser observado que em cada um dos estados está associado uma ação de manutenção que induz a uma taxa de recolocação ( $\mu$ ) para condição de “tão bom quanto novo”, ou seja, para o estado zero.

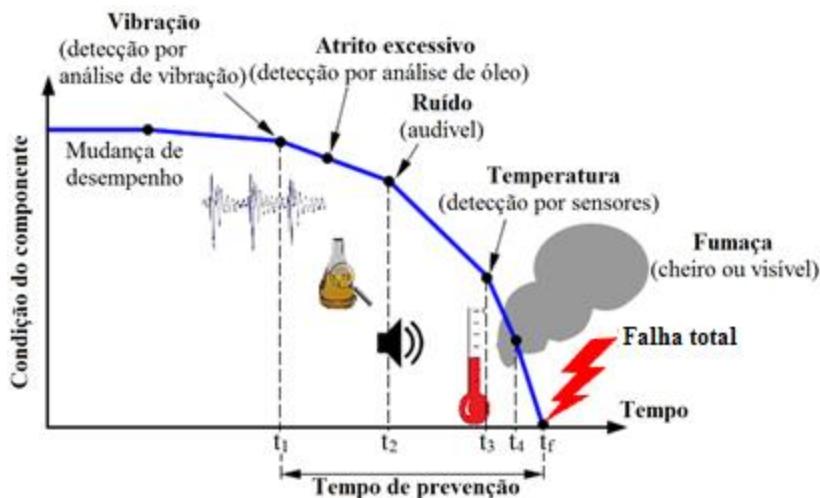
Outra interpretação que se pode observar a partir da Figura 1.4, é que dado que o sistema entra num Estado 3 através de uma taxa de falha

$\lambda_3$ , perdendo totalmente a sua função, a taxa de recolocação  $\mu_3$  pode representar uma ação de manutenção que leva o item para ou para algum nível de reaproveitamento como, reprojeto ou remanufatura.

Em face dos estados degradados (estados intermediários), o nível de desempenho funcional de sistema diminui com o passar do tempo e progride até a falha completa do sistema. Essencialmente, a degradação é gradual e produz efeitos, tais como: vibração, temperatura, ruído, folgas, desgastes e entre outros, como mostrado na Figura 1.5.

Há uma correlação entre a Figura 1.4 e a Figura 1.5, ou seja, cada um dos estados apresentados na Figura 1.4 pode ser relacionado com os efeitos produzidos pela degradação do sistema como indicado na Figura 1.5. Por exemplo, o Estado 1 da Figura 1.4 indica uma condição na qual o sistema apresenta atrito excessivo. Já o Estado 2, a condição que, além do atrito excessivo, o sistema possua um nível de ruído significativo e temperatura acima do estabelecido. E, por fim, no Estado 3, atinge-se a condição de falha total. A partir desse pressuposto, esses efeitos podem ser utilizados como referência para tomadas de decisão em nível do processo de projeto, operacional e de manutenção (KIMURA, 1997; SAKURADA, 2013, p. 105 - 106; TAKOUTSING, 2014).

Figura 1.5 - Exemplo de degradação de um sistema mecânico



Fonte: Adaptado de Takoutsing (2014).

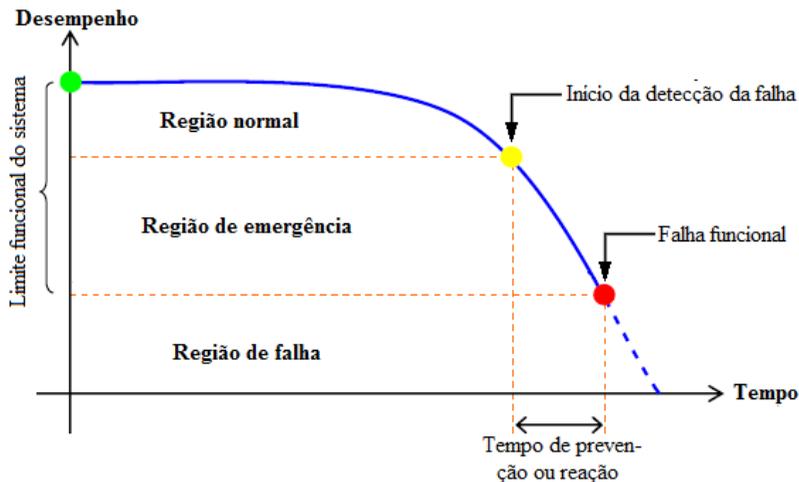
Um sistema no estado degradado pode, mesmo que parcialmente, ser capaz de executar sua função, como mostrado na Figura 1.6. Deve ser

observado que dependendo do nível da perda, da criticidade e da disponibilidade do sistema, esta falha pode suscitar efeitos catastróficos.

A identificação da falha em um sistema pode ser realizada pela monitoração de certos parâmetros e/ou variáveis de estado, como mostrado na Figura 1.5, para evitar tais situações de falhas totais ou de perda de desempenho (BHOJKAR, 2004). Desta forma, a predição das falhas de equipamentos reduz os custos associados ao tempo inoperante.

Nota-se ainda que na Figura 1.6 quando a região de emergência é grande, o tempo de prevenção ou reação é longo, fato que facilita as ações de manutenção e recolocação do item na condição de “tão bom quanto novo”. No entanto, o nível de degradação ( $\alpha$ ) aumenta, o tempo de reação diminui, o que pode comprometer a função geral do item.

Figura 1.6 - Representação do desempenho em função das regiões de operação do sistema



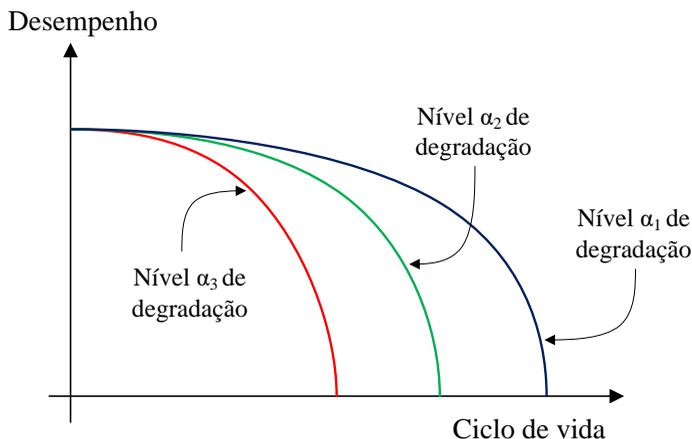
Fonte: Adaptado de Sakurada (2014).

A Figura 1.7 mostra a influência dos processos de degradação no desempenho funcional do sistema. Observe que a medida que o nível aumenta ( $\alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1$ ), a falha crítica do sistema acontece mais rapidamente.

Assim, o nível  $\alpha$  representa um fator de aceleração da degradação. Isto é, o mesmo potencializa a degradação a medida que os diferentes modos de falhas participam deste processo. Deste modo, indica-se que o sistema técnico contém mecanismos de degradação que comprometem o desempenho da função do sistema técnico mais rapidamente.

A perda de desempenho está associada ao caminho no qual o sistema percorre. Por exemplo, o nível  $\alpha_1$  de degradação, o sistema pode percorrer todos os estados apresentados na Figura 1.4. Já no nível  $\alpha_2$ , o sistema passa diretamente para o Estado 2 por meio da taxa de falha  $\lambda_2$  e, no nível  $\alpha_3$ , o sistema transita para o Estado 3 por meio da taxa de falha  $\lambda_3$ .

Figura 1.7 - Influência do processo de degradação no desempenho do sistema



Fonte: O autor.

Esta degradação, ou desgaste, dos componentes e equipamentos promovem a depreciação de capital e as despesas com a manutenção, ocasionadas pela necessidade de recuperação ou reposição dos componentes; a necessidade de superdimensionamento, problemas na produção devido a equipamentos deteriorados, entre outros (ZHANG; GUI, 2004; POPOV, 2010).

A partir dos anos 1960, ocorreu um aumento de estudos de problemas relacionados, principalmente, ao desgaste, atrito e lubrificação de sistemas mecânicos (ZHANG; GUI, 2004). E segundo Sinatora (2005) as estimativas de perdas por desgaste chegaram de 1% a 6% do Produto Nacional Bruto (PNB) do Brasil em 2004. Este percentual representa um montante de 17 a 104 bilhões de reais.

Neste contexto, algumas ações devem ser tomadas para evitar ou minimizar os problemas ocasionados pela degradação. Dessa maneira, a fim de auxiliar nesta tomada, uma sistemática que busque caracterizar o processo de falhas por degradação em sistemas técnicos, ou seja, as causas

que levam o item a perder sua função durante o ciclo de vida, se tornará de grande valia.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

Dentro deste contexto, o presente trabalho dispõe-se a desenvolver uma sistemática que permita organizar, analisar e caracterizar falhas por degradação em sistemas técnicos.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com o intuito de atingir o objetivo geral exposto, formularam-se algumas questões de pesquisa:

- Que tipo de informação deve ser extraída do sistema?
- Quais são os mecanismos de degradação que estão presentes no sistema técnico?
- Quais são os melhores parâmetros para descrever estado atual no que diz respeito a estes mecanismos de degradação?
- Tem-se conhecimento suficiente sobre como os processos de degradação afetam o sistema técnico?
- Existem dados relevantes para caracterizar e modelar estes processos?
- Existem ferramentas e dados suficientes para descrever o efeito destes processos?
- Como garantir que existe conhecimento suficiente para realizar a caracterização do processo de degradação?
- Como organizar as informações extraídas?
- Como avaliar a sistemática proposta?

Desta forma, propõe-se como objetivos específicos deste presente trabalho:

- Contribuir com o processo de análise de falhas em sistemas técnicos;
- Analisar os diferentes processos de degradação em sistemas técnicos;
- Selecionar técnicas empregadas na análise de falha, que melhor se aplicam aos processos de degradação;
- Aplicar a sistemática proposta em sistemas hidráulicos para fim de elucidação da aplicação da sistemática proposta e sua posterior avaliação;

- Sugerir formas de organizar as informações coletadas durante a aplicação da sistemática desenvolvida (*templates* de documentos);

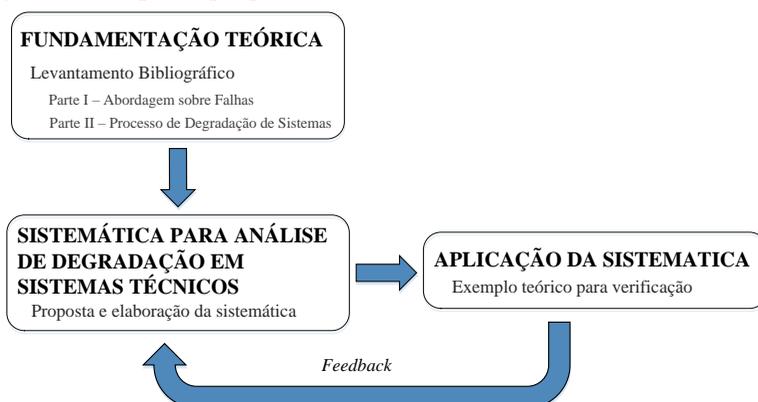
### 1.3 Metodologia da pesquisa

Este trabalho constitui de uma pesquisa exploratória, no qual o conhecimento tem abordagem mais prescritiva. Para tanto, utilizou-se Vargas (1985, p. 203-206) para planejar as atividades utilizadas neste trabalho. Essas atividades são:

- **Pesquisa bibliográfica:** sobre o assunto e seleção de trabalhos relacionados com tema da dissertação;
- **Análise fenomenológica:** estudo da ocorrência do fenômeno a fim de chegar as características que conferem ao fenômeno unidade e especificidade;
- **Revisão:** Rever e verificar possíveis inconsistências e propor melhorias;
- **Redação:** Elaborar o documento ou relatório da pesquisa.

Tento em vista estas atividades, formularam-se as etapas para elaboração do trabalho desta dissertação mostrados na Figura 1.8. A primeira etapa (Fundamentação Teórica) consiste no levantamento bibliográfico, orientado a dois campos: a um conteúdo sobre falhas em sistemas técnicos e o outro orientado aos processos de degradação de sistemas técnicos.

Figura 1.8 - Etapas da pesquisa



Fonte: Adaptado de Reinert (2013).

Com o resultado e análise deste levantamento será desenvolvida a sistemática proposta na segunda etapa. Já na terceira etapa será feita a aplicação da sistemática e o resultado será utilizado para melhorar a sistemática e para a proposição dos trabalhos futuros.

#### 1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em seis capítulos. Esta divisão foi elaborada de modo a orientar a compreensão da sistemática desenvolvida, no qual os capítulos estão estruturados envolvendo as áreas de conhecimento que permeiam o assunto da dissertação. Desta forma, os capítulos apresentam os seguintes conteúdos:

- **Capítulo 1 (Introdução):** uma breve introdução ao tema, apresentando os objetivos do trabalho;
- **Capítulo 2:** abordará os conceitos pertinentes a teoria de confiabilidade, tais como: definição de falha; tipos de falhas; técnicas utilizadas para a análise de falhas.
- **Capítulo 3:** discorrerá sobre os processos de degradação de sistemas elucidando sua definição e tipo. Também, exemplificará alguns trabalhos que abordam tal processo;
- **Capítulo 4:** discutirá a proposta metodológica desenvolvida no presente trabalho, trazendo sua estrutura básica, documentos e ferramentas utilizadas;
- **Capítulo 5:** apresenta a aplicação da proposta metodológica desenvolvida no presente trabalho e, também, o resultado do processo de avaliação realizado para identificação das vantagens e desvantagens da sistemática proposta;
- **Capítulo 6:** apresentará as principais contribuições resultantes da pesquisa e algumas considerações sobre possíveis desdobramentos da pesquisa em trabalhos futuros.

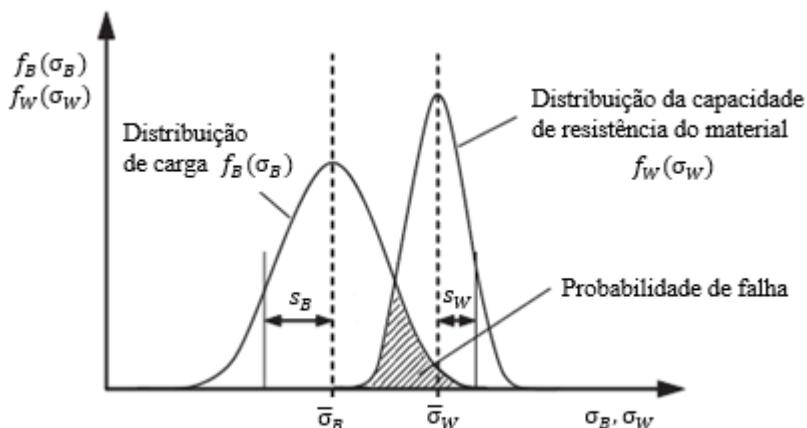
## 2 ABORDAGEM SOBRE FALHAS

### 2.1 Introdução

Como já exposto, a falha é inerente a qualquer sistema e pode ser evitada, porém o modo como ela se manifesta pode ser estudado, previsto e controlado (BELLINI, 2008). Desta maneira, o processo de análise de falha é importante e, para ser realizado, é necessário fazer uso de diferentes técnicas que auxiliam no levantamento de informações e no entendimento do funcionamento do sistema em análise.

Dentro deste contexto, as falhas podem ser abordadas de duas formas distintas: uma estrutural e outra funcional. Na estrutural, a falha é observada sob o ponto de vista da resistência mecânica a uma determinada carga, como o visualizado na Figura 2.1. As falhas proveem, quando em um determinado tempo do ciclo de vida, há uma sobreposição entre as distribuições de carga e a capacidade de resistência do material. Por exemplo a ruptura ou empenamento de um eixo-árvore ocorreu por sobrecarga ou um pico de sollicitação além do resistido pelo material do eixo-árvore.

Figura 2.1 - Probabilidade de falha sob o ponto de vista de resistência mecânica do material



Fonte: Adaptado de Bertsche (2008).

Já na abordagem funcional, a falha é vista como o não cumprimento de uma determinada função para qual o sistema técnico foi desenvolvido para executar. Apesar desta distinção entre as abordagens,

em ambas é muito importante que se tenha, bem definida, a função do componente, pois é a referência para se verificar quando o item está em falha ou não (SAKURADA, 2001).

O Quadro 2.1 mostra uma abordagem do modo de falha do ponto de vista funcional e estrutural para um eixo-árvore. Observe que o modo de falha funcional se relaciona com o subsistema ou sistema no qual atua e que o modo de falha estrutural com a propriedades físicas e químicas do material do eixo-árvore.

Quadro 2.1 - Diferença de abordagem do modo de falha para um eixo-árvore

Componente	Função	Modo de falha funcional	Modo de falha estrutural
Eixo-árvore	Transmitir movimento, torque.	Não transmite movimento, não transmite torque.	Ruptura, empenamento, desgaste.

Fonte: Adaptado de Sakurada (2001).

## 2.2 Definições de falhas

De acordo com a definição da OREDA (*Offshore Reliability Data*), a falha de um sistema técnico ocorre quando há a interrupção ou a degradação da habilidade de um item desempenhar suas funções requeridas (OREDA, 2002).

Para o ABS (*American Bureau of Shipping*), falha é o estado ou condição no qual um componente deixa de satisfazer alguns aspectos de projeto desejados (ABS, 2004). Já, segundo a norma SAE JA1011, falha é a forma pela qual uma função é perdida ou comprometida (SAE, 1999). A NASA estabelece falha como o cessar de uma função ou desempenho adequado (NASA, 2000).

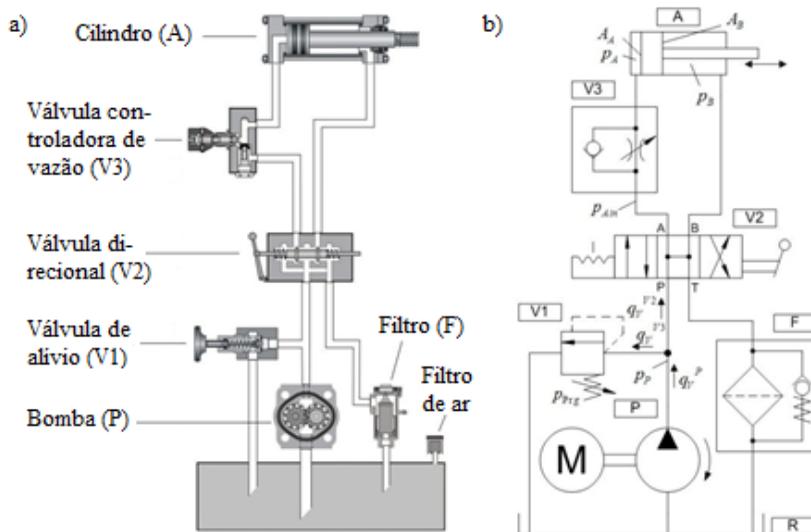
Finalmente, a norma ABNT NBR 5462 define falha como o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida (ABNT, 1994). Desta forma, se pode observar que todos os conceitos são semelhantes e centram-se, principalmente, no não cumprimento de uma determinada função para qual foi o sistema técnico foi projeto.

Por exemplo, a Figura 2.2 mostra um circuito hidráulico e seus respectivos componentes que podem ser utilizados para conformar peças dentro de certas especificações. Dentro deste contexto, a falha do circuito é caracterizada por não conformar a peça dentro destas especificações.

Observe ainda, que se poderia trabalhar este conceito em um nível mais detalhado, tratando cada um dos itens que compõe o sistema. Um

exemplo, uma vez que a bomba é responsável pela vazão do sistema, a falha da mesma poderia ser: o não fornecimento da vazão ou o fornecimento excessivo de vazão para o sistema.

Figura 2.2 - Circuito hidráulico: a) Ilustração; b) Diagrama do circuito



Fonte: Adaptado de LISINGEN e DE NEGRI (2012).

### 2.3 Tipos de Falha

A falha por ser caracterizada segundo quatro referenciais: mecanismo de falha, modo de falha, causa e efeito. A causa da falha está relacionada com as circunstâncias relativas ao projeto, fabricação ou uso (ABNT, 1994; IEC, 1990). O efeito é as consequências resultantes do modo de falha e suas causas (ABS, 2004), e também, é a forma em que o modo de falha pode ser percebido pelo observador (DIAS, 2013).

De acordo com Murthy et. al. (2008), o modo de falha pode ser observado como um desvio de um desempenho aceitável de uma função. Semelhantemente, segundo Dias (2013), os modos de falha são a forma que ocorre a falha, a maneira pela qual se apresenta, ou seja, a maneira do componente deixar de executar a sua função ou desobedecer às especificações. Por fim, os mecanismos de falha estão relacionados com os processos físicos, químicos ou outros que conduzem ao modo de falha (ABNT, 1994; IEC, 1990).

Dentro deste contexto, as falhas podem ter distintas classificações e, usualmente, estão conectadas com as causas, efeitos e modos de falha. Por exemplo, de acordo com a norma NBR 5462 (1994), falhas podem ser: de projeto (falha devida a projeto inadequado), de fabricação (falha devida à não-conformidade da fabricação com o projeto ou com os processos de fabricação especificados), crítica (falha que provavelmente resulta em condições perigosas e inseguras para pessoas, danos materiais significativos ou outras consequências inaceitáveis), não-crítica (aquela que não é crítica), falha por envelhecimento (devido aos efeitos do tempo ou do uso).

Em algumas aplicações, pode ser útil classificar as falhas em dois tipos: **sistemáticas** e **aleatórias**. As falhas sistemáticas ocorrem devido a erros de *hardware* ou *software*, que sob alguma combinação particular de *inputs* ou condições ambientais, irão permitir o sistema venha a falhar. Já as falhas aleatórias ocorrem em um tempo aleatório e resulta de um ou mais mecanismos de degradação do sistema (IEC, 1997).

Este tipo de falha, apesar do caráter imprevisível, pode ser tratado num sentido probabilístico ou estatístico, assim, ganhando uma certa previsibilidade. Outro ponto a ser observado, é que, neste tipo, as ações de manutenção não são capazes de eliminar a causa de uma falha sistemática.

Uma classificação importante para o presente trabalho consiste nas falhas **por deterioração** e **por degradação**. Estas definições foram estabelecidas da seguinte forma na norma NBR 5462 (1994):

- **Falhas por deterioração:** são resultantes de mecanismos de deterioração inerentes ao item, os quais determinam uma taxa de falha instantânea crescente ao longo do tempo.
- **Falhas por degradação:** proveem em uma mudança gradual com o tempo de dadas características de um item (falha gradual) e que resulta na incapacidade do item desempenhar algumas, mas não todas funções requeridas (falha parcial).

Pode-se perceber que estes dois tipos de falhas estão correlacionados, e ambos os casos estão relacionados com o desgaste do sistema.

## 2.4 Quantificação das falhas

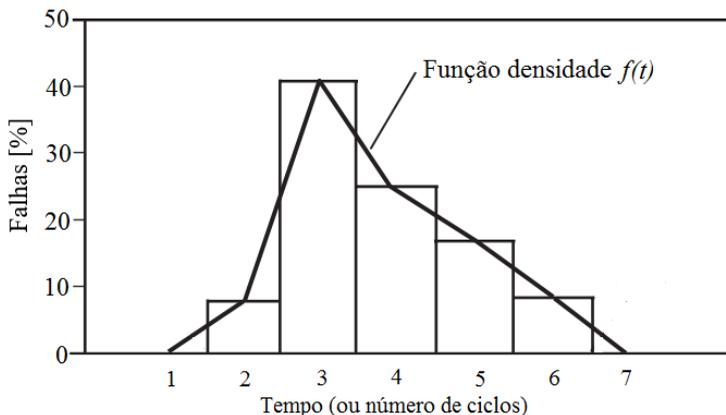
A taxa de falha corresponde ao número de falhas que ocorrem por unidade de tempo. Ou seja, é a razão entre o número de sistemas que falharam em um dado intervalo de tempo e o número total de sistemas expostos às falhas, conforme descrito na Equação 2.1.

$$\lambda(t) = \frac{\text{número de falhas por unidade de tempo}}{\text{número total de sistemas expostos à falha}} \quad (2.1)$$

Apesar da aleatoriedade, mesmo quando os sistemas idênticos atuam sob as mesmas condições, é possível perceber que os sistemas falham com mais frequência em um certo período (ou ciclo) (BERTSCHE, 2008). Isto pode ser observado que na Figura 2.3, onde as falhas concentram-se no terceiro ciclo (41,7%).

Outro fato importante que pode ser percebido é que ao invés de se utilizar um histograma para representar a porcentagem de falha, poder-se-ia uma função densidade  $f(t)$  que descreve o comportamento das falhas neste período analisado. Na Figura 2.3, mostra um exemplo de função densidade  $f(t)$ , na qual a função tenta a uma curva log-normal.

Figura 2.3 - Histograma das frequências de falha e função densidade



Fonte: Adaptado de Bertsche (2008).

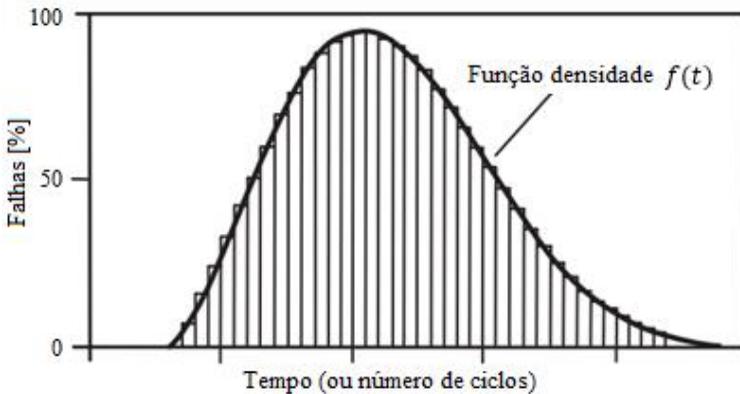
A medida que o número de sistemas testados tende ao infinito, a função  $f(t)$  torna-se suave e contínua como mostrado na Figura 2.4

(BERTSCHE, 2008). E a esta função é dado o nome de função densidade de falha.

A partir da integração da função densidade de probabilidade de falha  $f(t)$  (ver Equação 2.2 e Figura 2.5) pode-se calcular uma função denominada de probabilidade acumulada de falha (função não-confiabilidade). Esta é uma função crescente que representa a porcentagem de itens que falharam até o instante  $t$ .

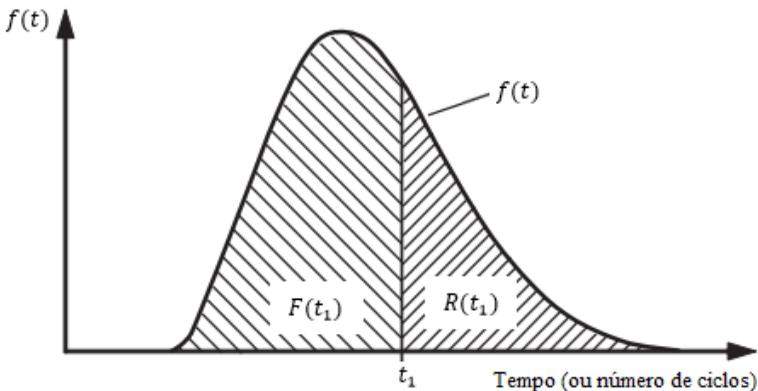
$$F(t_1) = \int_0^{t_1} f(t) dt \quad (2.2)$$

Figura 2.4 - Função densidade de falha



Fonte: Adaptado de Bertsche (2008).

Figura 2.5 - Relação entre a confiabilidade e não-confiabilidade



Fonte: Adaptado de Bertsche (2008).

A porcentagem de itens que não falharam até um instante  $t_1$  corresponde ao que se pode denominar de confiabilidade e é calculado de acordo com a Equação 2.3.

$$R(t_1) = 1 - F(t_1) \quad (2.3)$$

Generalizando a definição da taxa de falha, tem-se a razão entre a função densidade de probabilidade de falha  $f(t)$  e função confiabilidade  $R(t)$ , conforme mostrado na Equação 2.4.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.4)$$

Além da definição matemática, a confiabilidade é definida como:

- “A probabilidade de um sistema desempenhar seu propósito adequadamente por um período desejado, dentro das condições de operação encontradas” (BILLINTON; ALLAN, 1992, p. 6);
- “Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sobre condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo” (ABNT, 1994, p. 3);
- “A probabilidade de um sistema ou produto desempenhar a função de forma satisfatória, por um determinado período de tempo, quando operado sobre especificadas condições de operação” (BACK et al., 2008, p. 555).

Note que estas definições estão bem próximas da relação matemática mostrada na Equação 2.3. Independentemente da definição, quatro conceitos fundamentais ou estruturas estão presentes: probabilidade (natureza probabilística), comportamento adequado (existência de um padrão de referência), período de uso (natureza temporal) e condições de uso (exigência de requisitos, que são estabelecidos no projeto do sistema) (DIAS, 1996).

Como mostrado, o comportamento das falhas pode ser representado por uma distribuição de probabilidade. As distribuições de probabilidade<sup>1</sup> mais utilizadas no campo da confiabilidade são: binomial; normal ou gaussiana; log-normal; exponencial; Poisson; Gamma;

---

<sup>1</sup> Para maiores esclarecimentos sobre as distribuições de probabilidades consultar as referências: Bertsche (2008); Billinton & Allan (1992); O’connor & Kleyner (2012) e Rausand & Høyland (2004).

Rayleigh; Weibull, entre outras. Geralmente, as distribuições mais utilizadas para descrever os processos de degradação, são as exponenciais, de Weibull e Gamma.

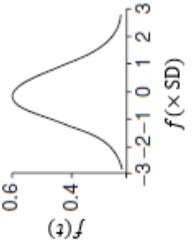
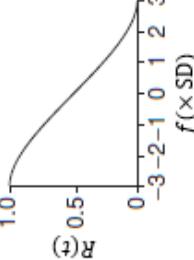
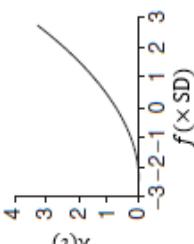
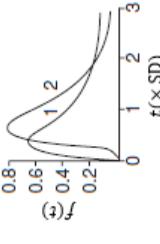
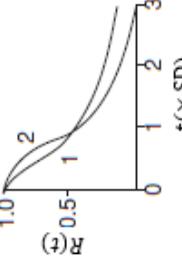
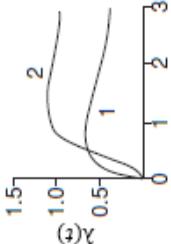
O Quadro 2.2 apresenta cinco destas distribuições de probabilidade. Apesar das distribuições normal e log-normal serem amplamente utilizadas no campo da estatística, estas distribuições são pouco utilizadas no estudo da confiabilidade. Entretanto, a distribuição log-normal pode ser usada em sistemas reparáveis (BILLINTON; ALLAN, 1992, p. 194). Tanto a distribuição normal, como a log-normal se caracterizam por dois parâmetros que são a média e o desvio padrão.

As distribuições, exponencial e Weibull, são bastante utilizadas em confiabilidade, sendo que a exponencial pode ser obtida a partir da distribuição de Weibull, quando o parâmetro de forma ( $\beta$ ) é igual a 1. Na distribuição exponencial a taxa de falha ( $\lambda$ ) é constante, e com o passar do tempo a probabilidade do componente falhar aumenta. Essa taxa de falha constante deve ser entendida como a taxa obtida a partir de falhas advindas de mecanismos e modos de falhas gerados por causas aleatórias, ou seja, sem uma tendência de ocorrência.

A distribuição de Weibull é dita tri-paramétrica, pois se caracteriza por três parâmetros: o parâmetro de localização ( $y$ ) ou vida mínima (tempo no qual as falhas começam a ocorrer); o parâmetro de forma ( $\beta$ ) e o parâmetro de escala ( $\eta$ ) ou vida característica (intervalo de tempo entre a vida mínima e  $t$  no qual ocorrem 63,2% das falhas). Conforme a combinação desses parâmetros pode-se gerar outras distribuições. Alterando-se o parâmetro de forma ( $\beta$ ), por exemplo, pode-se gerar uma distribuição hiper-exponencial ( $\beta < 1$ ), exponencial ( $\beta = 1$ ), Rayleigh ( $\beta = 2$ ) e normal ( $\beta \geq 3,44$ ).

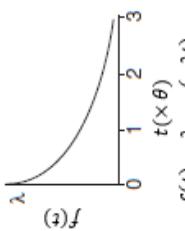
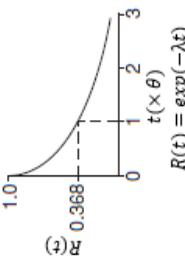
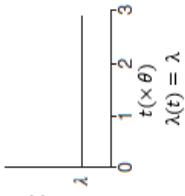
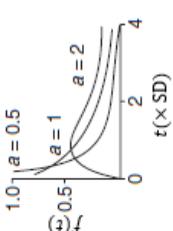
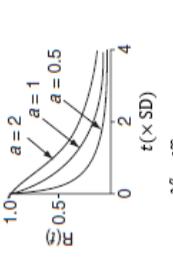
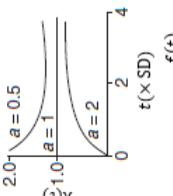
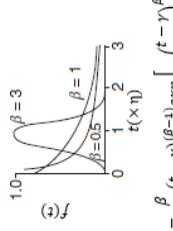
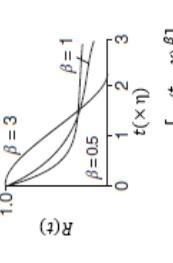
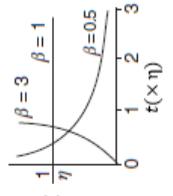
A distribuição Gamma é similar a distribuição de Weibull. A distribuição Gamma é uma distribuição que no campo da confiabilidade pode ser utilizada para descrever quando existem falhas parciais, isto é, quando um determinado número de eventos de falhas parciais deve ocorrer antes que um componente falhe (O'CONNOR; KLEYNER, 2012, p. 36-37). Esta distribuição é caracterizada por dois parâmetros, a taxa de falha ( $\lambda$ ) e o número de falhas parciais ( $a$ ).

Quadro 2.2 - Formas comuns de distribuição de probabilidade utilizadas para representar as funções densidades de probabilidade de falha

Tipo de distribuição	Parâmetros	Função Densidade de Probabilidade $f(t)$	Função Confiabilidade $R(t) = 1 - F(t)$	Taxa de falha $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$
Normal ou gaussiana	Média ( $\bar{x}$ ) Desvio padrão (SD)	 $f(t) = \frac{1}{SD(2\pi)^{1/2}} \exp \left[ -\frac{(t - \bar{x})^2}{2SD^2} \right]$	 $R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$	 $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$
Log-normal	Média ( $\bar{x}$ ) Desvio padrão (SD)	 $f(t) = \frac{1}{SD.t.(2\pi)^{1/2}} \exp \left[ -\frac{(\ln t - \bar{x})^2}{2SD^2} \right]$	 $R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$	 $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$

Fonte: Adaptado de O'Connor & Kleyner (2012, p. 42-43).

Quadro 2.2 - Formas comuns de distribuição de probabilidade utilizadas para representar as funções densidades de probabilidade de falha (continuação)

Tipo de distribuição	Parâmetros	Função Densidade de Probabilidade $f(t)$	Função Confiabilidade $R(t) = 1 - F(t)$	Taxa de falha $\frac{f(t)}{R(t)}$ $\lambda(t) = \lambda$
Exponencial	Taxa de falha ( $\lambda$ ) MTBF (=SD) ( $\theta$ ) $= \lambda^{-1}$	 $f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda t)$	 $R(t) = \exp(-\lambda t)$	
Gamma	Taxa de falha ( $\lambda$ ) $SD = a^{1/2}/\lambda$ Quando $a$ é inteiro $\Gamma(a) = (a-1)!$	 $f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(a)} (\lambda t)^{(a-1)} \exp(-\lambda t)$	 $R(t) = \frac{\lambda^a}{\Gamma(a)} \int_t^{\infty} t^{(a-1)} \exp(-\lambda t) dt$	
Weibull	Parâmetro de forma ( $\beta$ ) Vida característica ( $\eta$ ) Parâmetro de localização ( $\gamma$ )	 $f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{(\beta-1)} \exp \left[ - \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right]$	 $R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right]$	

Fonte: Adaptado de O'Connor & Kleyner (2012, p. 42-43).

## 2.5 Técnicas de análise de falhas

Dada a complexidade envolvida na análise de falha, é necessário fazer uso de diferentes formas de representar as funções que descrevem a função probabilidade utilizada para representar as funções densidade de probabilidade de falha, confiabilidade e taxa de falha (Quadro 2.2), além das técnicas que auxiliam no levantamento de informações, entendimento do funcionamento do sistema em análise, gestão do conhecimento, modelagem do sistema, entre outros (KAGUEIAMA, 2012).

Estas técnicas podem ser aplicadas em vários estágios do ciclo de vida de um produto e possuem diferentes propósitos. Abaixo estão exemplificadas algumas destas técnicas:

- Diagramas de causa-efeito;
- Análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA – *Failure Modes and Effects Analysis*);
- Análise da árvore de falha (*Fault Tree Analysis* - FTA);
- Análise da árvore de eventos (*Event Tree Analysis* – ETA);
- Rede bayesianas;
- Cadeias de Markov.

Estas técnicas de análises de falhas podem se subdividir em dois tipos: qualitativas e quantitativas. O primeiro analisa os processos que conduziram as falhas como os modos de falha e causas que contribuem para a não-confiabilidade do sistema. O último utiliza dados reais de falhas combinados com modelos matemáticos (probabilísticos, na maioria dos casos) para produzir estimativas sobre a confiabilidade dos sistemas em questão (MURHTY *et al.*, 2008).

Em geral, algumas destas técnicas, também, podem ser classificadas em duas categorias: indutivas (*bottom-up*) e dedutivas (*top-down*). As técnicas indutivas partem de um nível mais baixo, por exemplo, de uma falha de um componente e como isso afetará o sistema. Nesta abordagem, um conhecimento do detalhamento e estrutura do sistema se faz necessário para analisar as condições da falha e sua propagação.

As técnicas dedutivas partem do efeito final e são estudadas as causas desta falha, ou seja, parte de um nível de sistema e progride a um nível de componente, por exemplo. Este tipo de análise é particularmente útil nas primeiras fases de projeto de um sistema (LAZZARONI *et al.*, 2011).

Posto isto e de acordo com os objetivos propostos neste trabalho, nos próximos tópicos serão apresentadas a técnica para análise funcional do sistema e as técnicas para análise de falha (FMEA/FMECA, FTA, CNEA e Cadeias de Markov)<sup>2</sup>.

### 2.5.1 ANÁLISE FUNCIONAL DE PRODUTO

Função pode ser entendida como a tarefa que o sistema deve executar. Para iniciar o processo de análise de falha, se torna necessário conhecer quais as funções esperadas do sistema que permitem avaliar seu desempenho. A partir de então, pode-se analisar como essas funções podem deixar de ser cumpridas, quais são ou serão os efeitos do não cumprimento das funções.

De acordo com Rausand & Høyland (2004), a análise funcional tem por objetivo:

- Identificar todas as funções do sistema;
- Identificar as funções requeridas nos diferentes arranjos de funcionamento do sistema;
- Proporcionar uma visão hierárquica das funções do sistema;
- Descrever como cada função é realizada;
- Identificar as inter-relações entre as funções;
- Identificar as interfaces com outros sistemas e com o meio-ambiente.

Uma forma de representar a estrutura de funções é apresentada no diagrama da Figura 2.6. Neste diagrama tem-se o desdobramento da função global (FG) em funções parciais (FP) e funções elementares (FE) através dos fluxos de energia, material e sinal. Observe que a falha causa uma alteração nesses fluxos.

---

<sup>2</sup> Neste tópico será mostrado de maneira geral as ferramentas utilizadas. Para maiores esclarecimentos sobre as técnicas consultar:

**Análise funcional:** Back et al. (2008); Dias et al. (2013) e Rausand & Høyland (2004);

**FMEA/FMECA e FTA:** Bertsche (2008); Dias et al. (2013); Kagueiama (2012); Murthy et al. (2008); O'connor & Kleyner (2012) e Stapelberg (2009) Stamatís (2003);

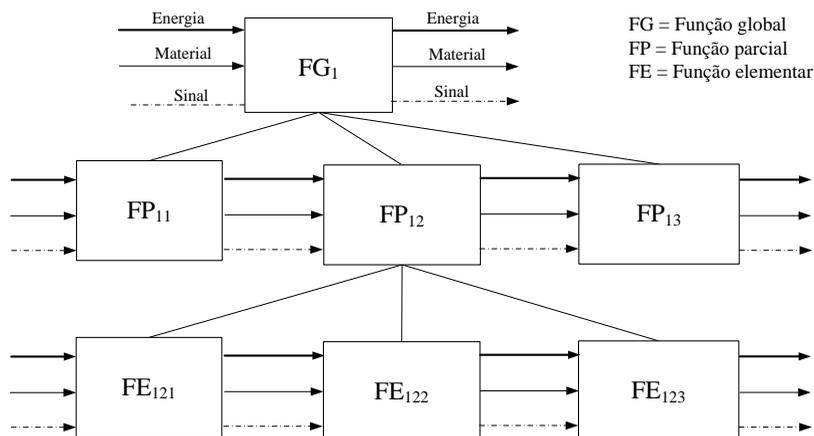
**CNEA:** Dias et al. (2008); Kagueiama (2012) e Sakurada (2013);

**Cadeia de Markov:** Bertsche (2008); Billinton & Allan (1992); O'connor & Kleyner (2012); Rausand & Høyland (2004), Stapelberg (2009) e Nakagawa (2011).

Vale ressaltar que o nível de detalhamento varia de acordo com a complexidade do sistema técnico. Além disso, o desdobramento deve parar quando não existe mais ganho significativo ou pode depender do problema a ser estudado (Back *et al.*, 2008; DIAS *et al.*, 2013).

Esta técnica ajuda na compreensão do sistema técnico, fora isto, ressalta ainda que a utilização da técnica é uma atividade iterativa, uma vez que, conforme o entendimento sobre o sistema aumenta, o modelo desenvolvido pode sofrer constantes atualizações.

Figura 2.6 - Desdobramento da função global na estrutura funcional do sistema



Fonte: Adaptado de Back *et al.* (2008).

### 2.5.2 FMEA/FMECA

A análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA – *Failure Modes and Effects Analysis*) ou análise dos modos de falhas, efeitos e criticidade (FMECA – *Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis*) é uma técnica amplamente utilizada na área de confiabilidade (BERTSCHE, 2008; O’CONNOR & KLEYNER, 2012; MURTHY *et al.*, 2008). Esta técnica é, normalmente, aplicada em análises de qualidade, manutenibilidade, confiabilidade e análise de risco (KAGUEIAMA, 2012; SAKURADA, 2013).

Esta técnica tem por objetivo identificar, analisar e avaliar as falhas em produtos, processos ou serviços. Há várias normas que tratam dos procedimentos do FMEA/FMECA, tais como: a MIL-STD-1629A, a SAE J1739 e a IEC 60812.

A diferença entre o FMECA e FMEA é a presença do índice de criticidade (NPR – número de prioridade de risco). Todavia, a FMECA é comumente denominada, também, de FMEA.

O NPR é calculado pelo produto da severidade, da ocorrência e da detecção. A severidade mede o impacto que a falha pode gerar para o sistema técnico, homem ou meio-ambiente, já a ocorrência relaciona-se com a frequência da falha e, por fim, a detecção relacionada com os meios de descobrir ou perceber a falha, ou seja, quanto mais fácil for a detecção mais baixo é o valor atribuído.

Os valores para severidade, ocorrência e detecção podem ser alocados conforme as normas, por exemplo, na SAE J1739, onde estes valores variam de 1 a 10.

Estas informações geradas pela técnica são organizadas e dispostas em forma de tabela. A Figura 2.7 mostra a tabela gerada pelo FMEA/FMECA e no Quadro 2.3 mostra a descrição de cada coluna.

Figura 2.7 - Exemplo de tabela de FMEA/FMECA

FMEA/FMECA

Sistema: \_\_\_\_\_ Número do FMEA/FMECA: \_\_\_\_\_  
 Subsistema: \_\_\_\_\_ Página: \_\_\_\_\_  
 Componente: \_\_\_\_\_ Responsável: \_\_\_\_\_ Desenvolvido por: \_\_\_\_\_  
 Ano do modelo: \_\_\_\_\_ Data-chave: \_\_\_\_\_ Data Original: \_\_\_\_\_  
 Equipe: \_\_\_\_\_ Data de revisão: \_\_\_\_\_

Item/ função	Modo de falha	Efeitos	S	Causas	O	Controles atuais	D	NPR	Ações recomendadas	Responsável	Ações executadas	S	O	D	NRP
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13			

Fonte: Adaptado de SAE (2000).

Quadro 2.3- Descrição das colunas do FMEA/FMECA

Número da coluna	Descrição
1	Nome do item (componente/ subsistema) que será analisado e o nome da função desempenhada.
2	Modo de como o item deixa de executar/cumprir a sua função ou desobedece às especificações.
3	Efeito indica a forma como o modo de falha se manifesta.
4	Índice que indica a severidade do efeito.
5	Motivos que levam a ocorrência do modo de falha.
6	Índice que indica a ocorrência da causa.
7	Controles existentes para prevenir e detectar as causas.

Fonte: Adaptado de SAE (2000).

Quadro 2.3- Descrição das colunas do FMEA/FMECA (continuação)

Número da coluna	Descrição
8	Índice que indica a dificuldade de detecção da causa.
9	Número de prioridade de risco, obtido a partir do produto dos índices de severidade, ocorrência e detecção.
10	Ações recomendadas para melhorar o controle sobre as causas.
11	Responsável pela implementação das ações recomendadas.
12	Ações recomendadas que foram implementadas.
13	Novo número de prioridade de risco após a implementação das ações.

Fonte: Adaptado de SAE (2000).

Segundo Dias et al. (2013), o objetivo principal da técnica é desenvolver conhecimento para orientar as ações a serem desenvolvidas para eliminar ou mitigar as causas dos modos de falha, e também atuar sobre os efeitos, principalmente, associados a severidades significativas.

Dentro deste contexto, a FMEA possui quatro tipos de abordagens: FMEA de Sistema (*System FMEA*), FMEA de Projeto (*Design FMEA*), FMEA de Processo (*Process FMEA*) e FMEA de Serviço (*Service FMEA*) (STAMATIS, 2003). Para a SisAD, o FMEA de Projeto atenderá às necessidades dos projetistas e o FMEA de Serviço atenderá às necessidades dos mantenedores.

### 2.5.3 FTA (*FAULT TREE ANALYSIS*)

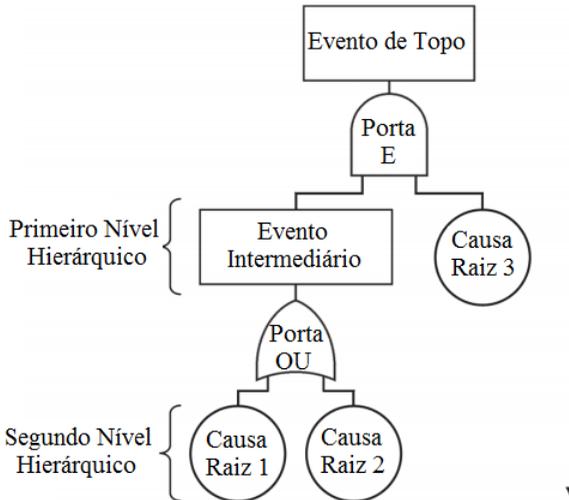
A *Fault Tree Analysis* (FTA) foi desenvolvida por H. A. Watson dos laboratórios *Bell Telephone*, que, em 1962, utilizou a FTA para análise do sistema de lançamento do míssil intercontinental *Minuteman* (RAUSAND & HØYLAND, 2004). FTA é uma técnica que utiliza o método dedutivo, ou seja, parte-se um determinado evento geral para um específico.

Segundo Ericson II (2005), a FTA é usada para determinar a causa raiz e a probabilidade de ocorrência de um dado evento indesejado. Este evento indesejável é conhecido como evento de topo, a partir do qual é desenvolvida a árvore na direção vertical. A Figura 2.8 mostra estrutura de uma árvore de falha.

O principal conceito na FTA é a transformação de um sistema físico em um diagrama lógico estruturado. A diagramação é feita

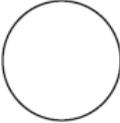
utilizando operadores lógicos, como “E” e “OU”. O Quadro 2.4 mostra a simbologia de eventos padrão utilizada nesta técnica.

Figura 2.8 – Exemplo de estrutura do FTA



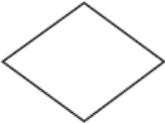
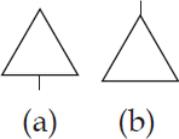
Fonte: Dias *et al.* (2013)

Quadro 2.4 - Simbologia de eventos padrão do FTA

Símbolo	Nome	Descrição
	Retângulo	Representa o evento de topo ou um evento intermediário resultante da associação lógica estabelecida entre as entradas presentes nas portas lógicas que compõem a árvore de falhas. No interior do retângulo identifica-se o efeito indesejado ou o modo de falha resultante naquele ponto da análise.
	Círculo	Representa as causas básicas ou raízes cujas associações lógicas estabelecidas na árvore de falhas resultarão no evento de topo. A profundidade da análise depende do limite de resolução da FTA estabelecido como satisfatório.

Fonte: Adaptado de Dias et al. (2013).

Quadro 2.4 - Simbologia de eventos padrão do FTA (continuação)

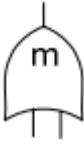
Símbolo	Nome	Descrição
	Losango	Representa eventos não desenvolvidos ou não analisados.
	Oval	Representa eventos condicionais, ou seja, os que, ocorrendo juntamente com outro pré-existente, produziram um resultado (evento de topo ou intermediário).
	Pentagrama ou casa	Representa a possibilidade do analista, de simular a ocorrência ou não de certos eventos representados na árvore de falhas. Ele pode ser suprimido da análise, o que permite associações lógicas diferentes nas ramificações subsequentes.
	Triângulo	Representa a transferência ou a cópia de uma ramificação da árvore de falhas. A ramificação transferida pode ser uma parte da árvore de falhas sob análise ou outra desenvolvida externamente à mesma.

Fonte: Adaptado de Dias et al. (2013).

Por meio da estruturação lógica entre os eventos que compõem o FTA é possível calcular a probabilidade de ocorrência do evento de topo. O Quadro 2.5 mostra a representação das portas lógicas utilizadas.

A FTA é uma técnica que pode ser combinada com outras técnicas de análise de falha. Por exemplo, a combinação da FTA com a FMEA pode calcular da falha de um sistema, transformando os modos de falha, efeitos e causas nos eventos da FTA. Vale ressaltar que, neste caso, existe a necessidade de conhecimento das probabilidades para cada um dos eventos.

Quadro 2.5 - Representação de algumas portas lógicas utilizadas no FTA

Símbolo	Nome	Descrição	Probabilidade de falha (%)
	Porta lógica "E"	O evento de saída só ocorre se todos os eventos de entrada ocorrerem simultaneamente. Caracteriza um sistema paralelo simples.	$F(t) = 1 - \prod_{i=2}^n [1 - F_i(t)]$
	Porta lógica "OU"	O evento de saída ocorre quando pelo menos um dos eventos de entrada ocorrer. Caracteriza um sistema série.	$F(t) = \prod_{i=2}^n F_i(t)$
	Porta Lógica "maioria"	O evento de saída ocorre se m ou mais entradas de um total de n ocorrerem.	$F(t) = \sum_{i=0}^{k-1} \frac{n!}{i! \cdot (n-i)!} \cdot [1 - F_0(t)]^i \cdot [F_0(t)]^{n-i}$ Onde $k = n - m + 1$
	Porta Lógica "não"	O evento de saída ocorre apenas se o evento de entrada não ocorrer.	$F(t) = 1 - F_1(t)$

Fonte: Adaptado de Dias et al. (2013).

#### 2.5.4 CNEA (CAUSAL NETWORK EVENT ANALYSIS)

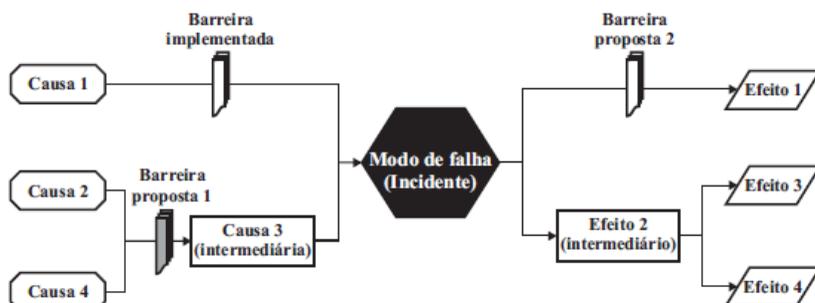
O desenvolvimento desta técnica deu-se a partir da percepção de que a BTA (*Bow-tie Analysis*) não satisfaz o nível de detalhamento requerido para que a análise das causas e efeitos de um modo de falha seja completa, uma vez que apenas lista as causas e consequências de um evento, sem apresentar a relação entre eles (DIAS et al., 2013). A CNEA foi elaborada no Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produto (NeDIP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), tendo como referência o desenvolvimento do trabalho de doutorado de Calil (2009) e o projeto MitiSF6 (2007).

A CNEA é uma técnica utilizada para a análise da ocorrência de um dado evento por meio da representação em rede causal e é recomendada para modos de falhas com alta frequência de ocorrência ou

com alta severidade. Com isso, pode-se mitigar a ocorrência e estabelecer as ligações entre o evento analisado, as causas, as consequências e as barreiras que atuam na corrente causal.

No diagrama do CNEA, o modo de falha fica centralizado e ao seu lado esquerdo se encontram as causas e no lado direito os efeitos. Além disto, são colocadas as barreiras, tanto já implementadas como as propostas, para diminuir a chance das causas deflagrarem o evento central (modo de falha) ou mitigar seus efeitos. A Figura 2.9 apresenta a estrutura básica de representação da CNEA.

Figura 2.9 - Estrutura da técnica CNEA



Fonte: Adaptado de Dias et al. (2013)

O principal benefício da técnica é a representação gráfica detalhada do relacionamento entre os eventos envolvidos na ocorrência das falhas. Ao contrário da FMEA que apenas lista tais eventos, a CNEA permite relacionar causas e efeitos, a partir do modo de falha de referência e as respectivas barreiras para atuar nas causas ou mitigar os efeitos do modo de falha (CALIL, 2009).

### 2.5.5 CADEIAS DE MARKOV

As Cadeias de Markov são Processos Estocásticos. Um Processo Estocástico é entendido como uma coleção de variáveis randômicas  $X(t)$  indexadas por um parâmetro  $t$  pertencente a um conjunto  $T$ . Frequentemente  $T$  é tomado para ser o conjunto dos inteiros não-negativos (porém, outros conjuntos são perfeitamente possíveis) e  $X(t)$  representa uma característica mensurável de interesse no tempo  $t$ . Exemplificando,  $X(t)$  pode representar o nível de estoque de um produto no fim da semana  $t$  (NAKAGAWA, 2011).

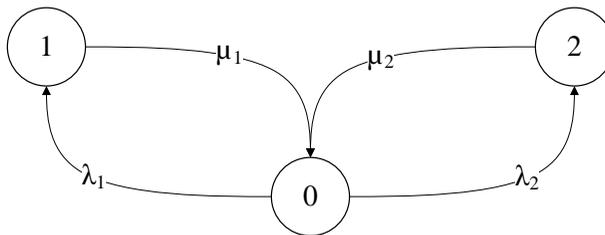
Processos Estocásticos descrevem, por exemplo, um sistema operando sobre algum período de tempo, com isso, em termos formais, a variável randômica  $X(t)$  representa o estado do sistema no parâmetro (geralmente tempo)  $t$ . Portanto, pode-se afirmar que  $X(t)$  é definido em um espaço denominado Espaço de Estados.

Os Processos Estocásticos podem ser classificados em relação ao estado e em relação ao tempo. No que se refere a estados podem ser: **estado discreto** (cadeia) (onde  $X(t)$  é definido sobre um conjunto enumerável ou finito) ou **estado contínuo** (sequência) (onde  $X(t)$  encontra-se no caso contrário). Em relação ao tempo têm-se: **tempo discreto** (onde  $t$  é finito ou enumerável) e **tempo contínuo** (onde  $t$  encontra-se no caso contrário).

Cadeias de Markov são processos estocásticos nos quais a variável  $X(t)$  estão definidas em um espaço discreto, e o estado posterior somente é dependente do estado atual (BERTSCHE, 2008, p. 366; BILLINTON & ALLAN, 1992, p. 260; STAPELBERG, 2009, p. 610). Além disso, a probabilidade de transição entre os estados deve permanecer constante (O'CONNOR & KLEYNER, 2012, p. 160).

Considere que um sistema possua três estados (dois estados de falha, estado 1 e estado 2, e um estado bom, estado 0) conforme mostrado no diagrama da Figura 2.10.

Figura 2.10 - Sistema com dois estados de falha



Fonte: Adaptado de Nakagawa (2011).

Na Figura 2.10,  $\lambda_1$  representa a taxa de transição do estado 0 para o estado 1,  $\mu_1$  representa a taxa de transição do estado 1 para o estado 0,  $\lambda_2$  representa a taxa de transição do estado 0 para o estado 2 e  $\mu_2$  representa a taxa de transição do estado 2 para o estado 0. Note que as taxas de transição,  $\mu$  e  $\lambda$ , representam as taxas de falha e de reparo ou recolocação do sistema.

Dado que  $P_i(t)$  representa a probabilidade do sistema está no estado  $i$  num determinado tempo  $t$ , onde  $i$  é igual a 0, 1 ou 2. Após a um intervalo

de tempo  $\Delta t$ , a nova probabilidade do sistema está em dos estados é igual a:

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t) \cdot [1 - (\lambda_1 + \lambda_2) \cdot \Delta t] + P_1(t) \cdot \mu_1 \cdot \Delta t + P_2(t) \cdot \mu_2 \cdot \Delta t \quad (2.5)$$

$$P_1(t + \Delta t) = P_0(t) \cdot \lambda_1 \cdot \Delta t + P_1(t) \cdot [1 - \mu_1 \cdot \Delta t] \quad (2.6)$$

$$P_2(t + \Delta t) = P_0(t) \cdot \lambda_2 \cdot \Delta t + P_2(t) \cdot [1 - \mu_2 \cdot \Delta t] \quad (2.7)$$

Desta forma, fazendo  $\Delta t$  tender a zero e por meio de manipulações matemáticas, pode-se representar matricialmente a probabilidade de estados futuros deste sistema a partir da Equação 2.8. A solução da Equação 2.8 resulta na função  $P_i(t)$  que descreve a probabilidade para cada estado a cada instante  $t$  tempo.

$$\mathbf{P}'(t) = \begin{pmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \mu_1 & \mu_2 \\ \lambda_1 & -\mu_1 & 0 \\ \lambda_2 & 0 & -\mu_2 \end{pmatrix} \mathbf{P}(t) \quad (2.8)$$

Onde:

$\mathbf{P}'(t)$ : matriz equações diferenciais de cada estado

$\mathbf{P}(t)$ : Vetor de Probabilidade de Estado

A matriz que multiplica o vetor de probabilidade, também é conhecida como matriz de transição. Esta matriz pode ser vista como descrito no Quadro 2.6, onde a linha superior representa o estado de origem e a primeira coluna representa o estado final. Nos cruzamentos entre estas, é mostrado a taxa de transição entre os estados inicial e final.

Quadro 2.6 - Quadro das taxas de transição entre estados

		Estado inicial		
		0	1	2
Estado final	0	$-(\lambda_1 + \lambda_2)$	$\mu_1$	$\mu_2$
	1	$\lambda_1$	$-\mu_1$	0
	2	$\lambda_2$	0	$-\mu_2$

Fonte: Adaptado de Nakagawa (2011).

Note que o modelo markoviano permite visualizar os efeitos da não-confiabilidade dos componentes em todo sistema técnico. E é por

intermédio da matriz de representação da Cadeia de Markov que se pode analisar o desempenho do sistema em diferentes hipóteses e a evolução no decorrer do tempo. Além deste fato, a Cadeia de Markov leva em conta a reparabilidade e a ordem em que ocorrem falhas no sistema (LAZZARANI, 2011, p. 95).

## **2.6 Considerações finais**

Ao longo do Capítulo 2 foram apresentados conceitos referentes a falhas, além de técnicas de análise de falhas. Percebe-se que os sistemas técnicos falham por dois motivos: por terem chegado no final do ciclo de vida ou por problemas advindos do meio, da operação ou da manutenção.

Tais problemas potencializam os processos de degradação de um sistema técnico, levando a que a falha aconteça mais rapidamente. Contudo, muitos desses problemas poderiam ter sido minorados, caso o projeto do sistema técnico tivesse sido devidamente elaborado para considerar devidamente atributos (tais como, confiabilidade e manutenibilidade) ou uma adequação dos procedimentos de operação e manutenção.

É neste sentido, que o uso de técnicas de análise de falhas facilita a aquisição, organização e representação do conhecimento das falhas nos sistemas técnicos, sendo utilizadas nos processos de projeto, uso e manutenção.

As técnicas de análise de falha discutidas no Capítulo 2 permitem uma análise qualitativa (FMEA, FTA e CNEA) e quantitativa (FTA e Cadeias de Markov) das falhas. A sistemática proposta irá utilizar estas técnicas como a base para o tratamento das informações dos processos de degradação com vistas a obter soluções de manutenção ou de reprojeção.

Note que, durante a operação do sistema técnico, as falhas alteram os fluxos de energia, material e sinal e essas alterações podem ser percebidas por meio inspeções ou instrumentos de monitoramento no sistema técnico. Veja que estes pontos podem ser utilizados para caracterizar os estados de falhas, ou estados de degradação e a partir dessa contagem podem ser estimadas as taxas de falhas para estes níveis de degradação.

No Capítulo 3, tratar-se-á de forma mais específica sobre os processos de degradação de sistemas técnicos.

### 3 PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO DE SISTEMAS TÉCNICOS

#### 3.1 Introdução

Principalmente a partir dos anos 1960, houve o aumento de estudos de problemas relacionados ao atrito, lubrificação e desgaste em sistemas mecânicos (ZHANG; GUI, 2004). De acordo com Popov (2010), o desgaste é uma das principais causas de danos nos sistemas técnicos.

O desgaste de componentes e equipamentos contribui para a depreciação de capital e das despesas com manutenção, devido à necessidade de reposição ou recuperação dos componentes; a necessidade de superdimensionamento, problemas com a produção devido a equipamentos deteriorados, fora as interrupções imprevistas das linhas de produção. Dessa maneira, algumas ações devem ser tomadas para evitar este tipo de problema, como: escolha apropriada do material, um projeto adequado, tratamentos superficiais, uma manutenção adequada, entre outros. (ZHANG; GUI, 2004; POPOV, 2010).

De acordo com Sinatora (2005) as estimativas de perdas por desgaste no ano de 2004 chegaram de 1% a 6% do Produto Nacional Bruto (PNB) do Brasil, o que representa um total de 17 a 104 bilhões de reais. Além disso, em tais estimativas não estão contabilizando as perdas ocasionais ou catastróficas.

O desgaste é uma das causas do processo de degradação de sistemas técnicos, e o mesmo tem impacto em duas medidas de confiabilidade: na taxa de falha e na vida útil. Essas medidas são importantes nos planos de manutenção, alocação de recursos ou outras decisões relacionadas a confiabilidade (LAI; XIE, 2006).

#### 3.2 Definição

Na literatura podem ser encontrados termos que se referem aos processos de degradação. São eles: *ageing*, deterioração e desgaste. Dentro do âmbito de confiabilidade está contido na terceira fase da curva da taxa de falha (Figura 1.2 e 1.3).

A norma NBR 5462 (1994), apesar de não apresentar o conceito do termo *ageing*, traz os termos falhas por degradação e deterioração, que estão relacionados com *ageing*, dado que a tradução do termo *ageing failure* é falha por deterioração (ABNT, 1994, p. 21).

*Ageing* é um processo em que fatores levam a uma mudança nas propriedades físicas ou químicas de componentes. Para ESReDA (2006, p. 112 – 127) é o processo em que as características de sistemas, estruturas

ou componentes mudam gradualmente com o tempo ou com o uso. No mesmo sentido, para a Associação das Indústrias de Óleo e Gás do Reino Unido define que é qualquer fator que, com o tempo, cause efeitos adversos na capacidade dos componentes de cumprir com a função para qual foi projetado (*Oil & Gas UK*, 2011, p. 23).

De acordo com Popov (2010, p. 271), o desgaste é um processo físico que leva a falha de máquinas e dispositivos. Nikulin et al. (2010, p. 17) afirma que o processo de degradação conduz a falha e que, geralmente, está relacionado com o crescimento de trincas, aumento da erosão, aumento da contaminação, entre outros.

Neste contexto, para o presente trabalho, define-se o processo de degradação como processo físico-químico pelo qual um sistema técnico perde, de forma gradual, a capacidade de cumprir com a função para qual foi projetado.

### 3.3 Mecanismos de degradação

Os processos físicos, químicos ou outros que conduzem às modificações nas propriedades dos componentes são chamados de mecanismos de degradação. Desta forma, dentro de uma abordagem de falha e com foco no atributo de confiabilidade, estes mecanismos podem ser compreendidos como a causa raiz da falha.

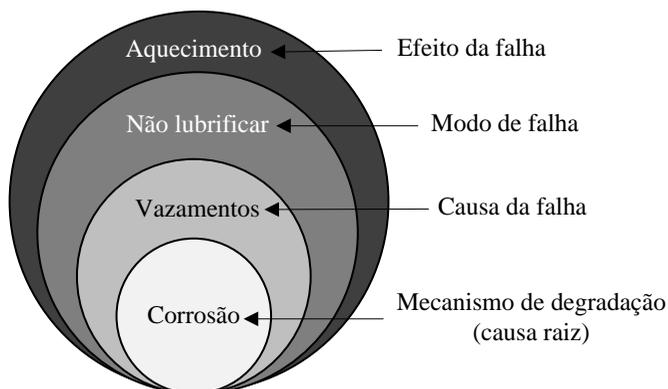
Por exemplo, considere que haja uma falha de subsistema de lubrificação. Para se compreender como esta falha ocorreu, pode-se fazer perguntas simples, tais como:

- **Como o operador percebe?** O sistema está aquecendo, logo o aquecimento do sistema é o efeito da falha.
- **Por que o sistema está aquecendo?** Porque não há lubrificação, logo não lubrificar é o modo de falha.
- **Por que o sistema não está sendo lubrificado?** Porque existe um vazamento na tubulação. Assim, a causa da falha é o vazamento.
- **Por que aconteceu o vazamento?** Porque a corrosão ocasionou um furo na tubulação. Desta maneira, a corrosão é a causa raiz e, também é um mecanismo de falha por degradação.

A Figura 3.1 sugere uma forma de organizar o processo de análise de falha no subsistema de lubrificação, destacando a percepção externa do efeito de aquecimento, cujo modo de falha é a não lubrificar, que tem como causa imediata o vazamento de óleo, proporcionado por um

mecanismo de falha de corrosão. Note que dependendo de como é feito a análise a corrosão pode ser vista, também como um modo de falha.

Figura 3.1- Causa raiz de uma falha de um subsistema de lubrificação



Fonte: O autor.

Existem muitos mecanismos de degradação de sistemas técnicos. Estes mecanismos dão origem às causas de falhas, que estão intimamente relacionados com os modos de falhas. Este trabalho não procura demonstrar todo este inter-relacionamento, uma vez que é muito amplo, depende da visão e do conhecimento do usuário sobre a rede causal do sistema.

O Quadro 3.1 exemplifica um possível relacionamento entre os mecanismos de degradação e algumas causas de falhas de sistemas técnicos. Já o Quadro 3.2 mostra de maneira resumida os conceitos de alguns destes mecanismos, bem como referências que podem ser utilizadas para um estudo mais detalhado no âmbito da confiabilidade.

Quadro 3.1 - Relação entre mecanismos de degradação/modo de falha e causas de falhas/efeito

		<b>Mecanismos de degradação/modo de falha</b>								
		<b>Fadiga</b>	<b>Corrosão</b>	<b>Erosão</b>	<b>Cavitação</b>	<b>Deterioração do material</b>	<b>Fluência</b>	<b>Desgaste adesivo</b>	<b>Desgaste abrasivo</b>	<b>Variações de temperatura</b>
<b>Causas de falhas/efeito</b>	<b>Obstrução</b>					X				
	<b>Ruptura /Fratura</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	<b>Explosão</b>		X	X	X	X	X	X	X	X
	<b>Desalinha- mento</b>	X						X	X	X
	<b>Folga</b>	X	X	X	X	X		X	X	X
	<b>Deformação</b>						X			X
	<b>Vazamento</b>		X	X	X	X		X	X	

Fonte: Adaptado de Hokstad *et al.* (2010).

Quadro 3.2 - Mecanismos de degradação: definições e referências

Mecanismo de degradação	Tipo de processo	Definição	Estimativa de cálculo	Referências
Corrosão	Processo químico/ eletroquímico	É um mecanismo de degradação onde ocorre a interação química ou eletroquímica do material com o meio que conduz a uma perda de material e/ou propriedades desejáveis do material. Há muitas formas de corrosão, tais como: ataque químico direto, corrosão galvânica, corrosão por fenda, corrosão por pites, corrosão intergranular, lixiviação seletiva e corrosão biológica. Além dessas formas a corrosão interagir com outros mecanismos, tais como desgaste, fadiga, cavitação.	$CRP = \frac{k \cdot m}{\rho \cdot A \cdot t}$ <p>Onde:  CRP: Perda de espessura de material por unidade de tempo  m: perda de massa (mg)  ρ: massa específica da liga metálica (g/cm<sup>3</sup>)  A: Área de exposição da amostra (cm<sup>2</sup>)  t: tempo de exposição (h)  k: constante dependente do sistema de unidades (igual a 87,6 neste caso)</p> <p>Ou:</p> $m = e \cdot i \cdot t$ <p>Onde:  m: massa de material desgastado (g)  e: equivalente eletroquímico do metal  i: corrente de corrosão (A)  t: tempo de exposição (s)</p>	Crowe e Feinberg (2001) Sosnovskiy (2005) Collins (2006) Callister (2007) O'connor & Kleyner (2012)
Fadiga	Processo físico ou físico-químico	É um mecanismo de degradação do material em que ocorre a redução da capacidade de carga de componentes estruturais pela ruptura lenta por meio do avanço quase infinitesimal da trinca a cada ciclo de carregamento. O processo de nucleação da trinca por fadiga depende das tensões cisalhantes cíclicas que atuam, enquanto que para a propagação são importantes as tensões de tração, que fazem com que as pequenas trincas que foram nucleadas venham a crescer e levem à ruptura final. As cargas ocorrem devido a variações de temperatura ou outras cargas aplicadas. Como os mecanismos que atuam na nucleação e na propagação são distintos, é necessário usar critérios diferentes para avaliar uma falha por fadiga na nucleação e na fase de propagação. A fadiga pode se desenvolver, por exemplo, juntamente com os efeitos da corrosão é conhecido como fadiga por corrosão.	$S_f = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_f$ <p>Onde:  S<sub>f</sub>: Limite de resistência a fadiga (MPa)  S'<sub>f</sub>: Limite de resistência a fadiga do corpo de prova (MPa)  k<sub>a</sub>: fator de acabamento superficial  k<sub>b</sub>: fator de tamanho ou dimensão  k<sub>c</sub>: fator de confiabilidade  k<sub>d</sub>: fator de temperatura  k<sub>e</sub>: fator de concentração de tensões  k<sub>f</sub>: fator para outros efeitos</p>	Da Rosa (2002) Sosnovskiy (2005) Collins (2006) Callister (2007) Nikulin <i>et al.</i> (2010) O'connor & Kleyner (2012) Vieira <i>et al.</i> (2013)

Fonte: O autor.

Quadro 3.2 - Mecanismos de degradação: definições e referências (continuação)

Mecanismo de degradação	Tipo de processo	Definição	Equação	Referências
Desgaste abrasivo	Processo físico	É um mecanismo de degradação que ocorre a perda de material devido ao atrito entre peças móveis. Ocorre quando as partículas de desgaste são removidas da superfície por sulcagem e ação cortante da rugosidade de uma superfície de acoplamento de maior dureza ou em contato com partículas duras aprisionadas entre as superfícies. Estima-se que este tipo de desgaste é o mais recorrente na Engenharia Mecânica, respondendo por praticamente metade dos processos de desgaste na indústria.	$D_{ab} = k_{ab} \cdot p_m \cdot L_s$ <p>Onde:  <math>D_{ab}</math>: Profundidade média do desgaste (m)  <math>k_{ab}</math>: Coeficiente de desgaste por abrasão (<math>m^3/N.m</math>)  <math>p_m</math>: Pressão média nominal de contato entre as superfícies (Pa)  <math>L_s</math>: Distância total de escorregamento (m)</p>	Stoeterau (2004) Sosnovskiy (2005) Collins (2006) O'connor & Kleyner (2012) Popov (2012)
Desgaste adesivo	Processo físico	É um mecanismo de degradação que ocorre a perda de material devido ao atrito entre peças móveis. É resultante da pressão elevada local e soldagem de pontos ásperos em contato, seguido de deformação plástica induzida por movimento e ruptura das junções, com conseqüente remoção ou transferência de metal.	$D_{ad} = k_{ad} \cdot p_m \cdot L_e$ <p>Onde:  <math>D_{ad}</math>: Profundidade média do desgaste (m)  <math>k_{ad}</math>: Coeficiente de desgaste por adesão (<math>m^3/N.m</math>)  <math>p_m</math>: Pressão média nominal de contato entre as superfícies (Pa)  <math>L_e</math>: Distância total de escorregamento (m)</p>	
Erosão	Processo físico	Remoção mecânica de material a partir de uma superfície, como um resultado do movimento relativo ou impacto a partir de sólidos, líquidos ou vapores. O desgaste erosivo é influenciado, por exemplo, pela velocidade do fluido, a densidade do fluido e das partículas, o coeficiente de arrasto, o número de Reynolds e o tamanho das partículas.	$W = f(\alpha) \cdot v^x \cdot d^y$ <p>Onde:  W: parâmetro de erosão  <math>f(\alpha)</math>: função determinada experimentalmente e está relacionado com o ângulo de ataque das partículas  v: velocidade média das partículas (<math>m/s^2</math>)  x: constante que varia entre 2 a 3,4  d: tamanho médio das partículas (m)  y: constante que varia entre 0,9 a 3,0</p>	Andrews (1980) Sosnovskiy (2005) Callister (2007) Dias (2012)

Fonte: O autor.

Quadro 3.2 - Mecanismos de degradação: definições e referências (continuação)

Mecanismo de degradação	Tipo de processo	Definição	Equação	Referências
Cavitação	Processo físico	É um mecanismo de degradação que ocorre a formação de bolhas no fluido numa região em que a pressão reduz para níveis abaixo da pressão de vapor, resultando em perda de metal local pelo o estouro das bolhas. Em termos gerais, a cavitação é prejudicial tanto para bomba quanto para o sistema hidráulico uma vez que induz a bomba a fornecer uma vazão anormal ou instável, além de provocar um ruído excessivo. Existem várias causas para a cavitação, tais como: excessiva rotação da bomba; óleo com alta viscosidade; diâmetro interno insuficiente da tubulação de sucção da bomba; excessiva perda de carga na tubulação de sucção da bomba; filtro de sucção sujo ou obstruído; filtro de ar no reservatório bloqueado e conexão de entrada da bomba muito alta com relação ao nível de óleo do reservatório. O dano da cavitação pode ser avaliado pelo módulo de resiliência do material.	$U_R = \frac{0,5 \cdot \sigma_r^2}{E}$ <p>Onde:  <math>U_R</math>: módulo de resiliência do material (MPa)  <math>\sigma_r</math>: tensão de ruptura do material (MPa)  <math>E</math>: módulo de elasticidade do material (N/m<sup>2</sup>)</p>	Totten, Will e Feldmann (2001) Franc e Michel (2005) Dias (2012)
Fluência	Processo físico	Deformação permanente, dependente do tempo, de materiais quando submetidos a carga ou tensão constante, a fluência é normalmente um fenômeno indesejável e às vezes o fator limitante na vida de um item. A fluência é observada em todos os tipos de materiais; para metais só se torna importante para temperaturas maiores do que cerca de $0,4T_m$ ( $T_m$ = temperatura absoluta de fusão).	$\delta = B \cdot t \cdot \sigma^N$ <p>Onde:  <math>\delta</math>: deformação verdadeira sob fluência sobre tensão axial (m)  <math>\sigma</math>: tensão no material (MPa)  <math>t</math>: tempo (s)  <math>B</math> e <math>N</math>: constantes calculadas a partir de curvas de fluência</p>	Crowe e Feinberg (2001) Collins (2006) Callister (2007) Popov (2012)

Fonte: O autor.

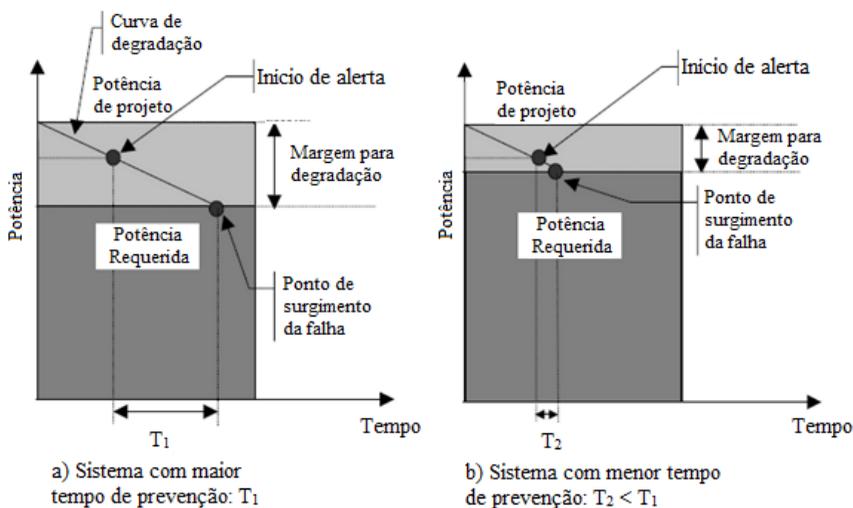


### 3.4 Indicadores dos processos de degradação

Por conta do processo de degradação ser gradual, pode-se monitorar o nível de degradação (NIKULIN *et al.*, 2010, p. 147). Segundo Vinadé (2003), os efeitos da degradação natural do sistema têm um tempo maior de prevenção caso o sistema em questão esteja dimensionado além do desempenho requerido.

A Figura 3.2 mostra dois sistemas idênticos com as mesmas características de projeto, todavia com desempenhos requeridos diferentes. Observe que o tempo de prevenção é menor quando a potência mínima requerida pelo sistema se aproxima da potência de projeto.

Figura 3.2 - Degradação de dois sistemas idênticos com desempenhos desejados diferentes



Fonte: Moubray (1997) apud Vinadé (2003).

Note que o tempo reação corresponde ao tempo de reação e ao tempo de manutenção. Segundo Sakurada (2013), o tempo de reação corresponde o intervalo de tempo em que o sistema entra na região de emergência (início de alerta na Figura 3.2) e o ponto que o sistema entra na região de falha (ponto de surgimento da falha na Figura 3.2).

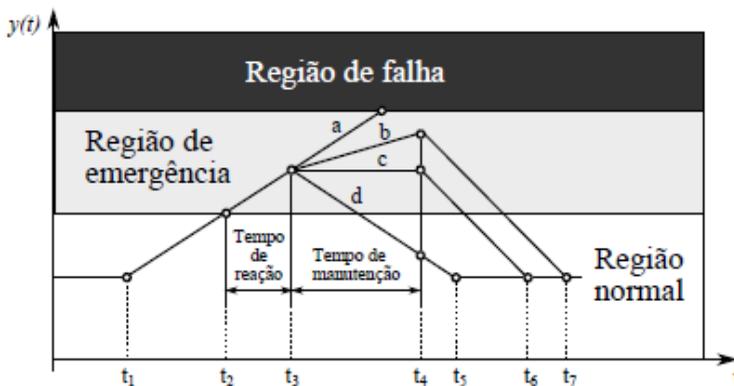
A região de emergência corresponde a um estado em que o sistema está fora da região normal de operação, mas ainda não constitui um estado de falha total (perda total da função). Nesta região, o sistema começa a indicar que um processo de falha está ocorrendo e já se torna possível

verificar este processo por meio de efeitos (aumento de temperatura, ruído e/ou vibração, por exemplo).

O sistema técnico estando na condição de emergência pode voltar a condição normal ou passar para condição de falha total. Essa transição depende políticas de manutenção do sistema, dos sistemas de controle de falha, entre outros fatores (SAKURADA, 2013).

A Figura 3.3 mostra o avanço da falha por diferentes trajetórias e os tempos de reação e manutenção para um sistema técnico, onde  $y(t)$  representa a variável de monitoramento e controle do sistema.

Figura 3.3 - Avanço da falha em um sistema técnico



Fonte: Sakurada (2013).

No caminho “a”, apesar da manutenção ter sido iniciada, as ações tomadas não foram capazes de impedir a falha do sistema ou o tempo necessário não foi o suficiente para conter o processo de falha.

Já no caminho “b” com as ações de manutenção efetuadas e foi possível retornar o sistema para região normal. Contudo, caso um tempo maior de manutenção também levaria o sistema a uma falha.

No caminho “c” não ocorre o avanço da falha, logo existe uma situação mais favorável para as ações de manutenção do que nos casos “a” e “b”.

Por fim, no caminho “d” foi realizada uma ação que permitiu a variável retornar para a região de operação normal, como a comutação para um sistema redundante. Nessa situação, a manutenção do componente em falha pode ser efetuada em paralelo e após ao reparo pode entrar em operação novamente, ou ficar na condição de reserva.

Perceba que a Figura 3.3 pode ser relida a partir da Figura 1.4, ou seja, pode-se interpretar que o caminho de degradação “a” leva a uma taxa de falha  $\lambda_3$  que leva à falha crítica do item. Logo, a manutenção deverá proceder com uma ação de recolocação do tipo  $\mu_3$ , como explicitado no Capítulo 1. De modo semelhante, pode-se repetir o raciocínio para os outros caminhos.

Note ainda que o nível de degradação é observado a partir de indicadores ou efeitos do modo de falha. De acordo com Hokstad *et al.* (2010, p. 28 - 30) existem vários indicadores e estão relacionados com: resultados de inspeções, ocorrência de falhas, estatísticas de eventos indesejados ou desempenho do processo. O Quadro 3.3 mostra exemplos destes indicadores.

Quadro 3.3 - Indicadores de monitoramento da degradação

	<b>Indicadores de ciclo de vida ou tempo</b>	<b>Exemplos</b>	<b>Comentário</b>
<b>Resultados de inspeção / monitoramento</b>	Parâmetro de monitoramento	Temperatura, ruído e vibração.	Indicam a condição do sistema técnico. O limiar de degradação pode ser determinado a partir da repetição de dados de inspeção.
	Inspeção	Defeito ou danos superficiais.	Defeito na pintura ou outros danos superficiais podem indicar que alguma degradação está ocorrendo (corrosão, por exemplo).
		Condição da pintura e das superfícies dos revestimentos.	Pode indicar uma falta de manutenção, aumentando o risco de corrosão, por exemplo.
		Contaminação do óleo.	Indica desgaste de componentes.
Lista de modos de falhas	Vazamentos.	Vazamentos podem ocorrer devido a fissuras, corrosão afrouxamento, desconexão.	

Fonte: Adaptado de Hokstad et al. (2010).

Quadro 3.3 - Indicadores de monitoramento da degradação (continuação).

	<b>Indicadores de ciclo de vida ou tempo</b>	<b>Exemplos</b>	<b>Comentário</b>
<b>Estatística de eventos indesejáveis</b>	Fase do ciclo de vida	Tempo de operação, idade total do componente.	Podem indicar a fase do ciclo de vida que o componente se encontra, quando havia sido definida no projeto.
	Número de incidente durante a operação	Vazamentos e paradas inesperadas.	Podem ser tratados para expressar as taxas de falhas que darão indicações para análise das mesmas.
	Número de reparos	Número de falhas ou reparos.	Indicam a taxa de recolocação apontando para as condições de manutenibilidade. Também podem indicar problemas com a degradação. Deve-se estabelecer as causas raízes das falhas/reparos.
<b>Desempenho do processo</b>	Falta de estabilidade do processo	Operação fora das especificações de projeto.	Desvio do padrão normal de operação significa que o sistema técnico está deteriorado.
	Instrumentação	Falta de conhecimento no funcionamento do processo.	Podem sugerir instabilidade no processo. Também pode indicar que o sistema técnico está deteriorado ou falha na instrumentação.
	Redução da eficiência da instalação	Redução na eficiência da bomba ou aquecimento.	Podem ser devido a vários fatores, como dimensionamento ou incrustação
	<i>Backlogs</i>	Acúmulo atividades de manutenção, tempo disponível para atividades de manutenção	Indicador da qualidade da manutenção.

Fonte: Adaptado de Hokstad et al. (2010).

A partir de indicadores como estes, Wu, Niknam e Kobza (2015) traçam um modelo de decisão para estratégias de manutenção baseadas na relação entre uma manutenção preditiva e a redução da degradação esperada para traçar um intervalo de monitoramento e custo relacionado a este monitoramento.

O Quadro 3.4 mostra outros exemplos de trabalhos relacionados com os processos de degradação encontrados.

Quadro 3.4 - Exemplos de trabalho sobre processos de degradação

Resumo do trabalho	Ferramentas e técnicas utilizadas
You e Meng (2012) propuseram uma abordagem de manutenção preventiva baseando-se na estimativa da vida residual do componente.	Estimativa de vida residual
Xu e Zhou (2006) calcularam a confiabilidade usando medições de degradação e modelos de processo de degradação com parâmetros aleatórios. Usaram como exemplo o crescimento de uma trinca.	Monte Carlo Redes bayesianas
Park e Padgett (2005) desenvolveram novos modelos de degradação e de falhas utilizando um processo estocástico, tais como o movimento <i>Browniano</i> geométrico ou processo de gama, e que incorpora uma variável de testes acelerados. Aplicou usando dados de resistores de filme de carbono e propagação de trinca por fadiga.	Distribuição Gamma Distribuição Gaussiana Inversa Movimento <i>Browniano</i> geométrico
Moghaddass e Zuo (2012) modelaram a condição de um sistema técnico através de uma abordagem de multiestado do processo de falha (degradação). Usa dados históricos da condição para calcular os parâmetros do processo de degradação.	Cadeias de Markov
Guida, Postiglione e Pulcini (2012) propuseram um modelo usando uma distribuição do tipo Gamma para descrever mecanismos de degradação. É aplicado em conjunto de dados reais de desgaste por deslizamento de quatro amostra de ligas metálicas.	Distribuição Gamma

Fonte: O autor.

Quadro 3.4 - Exemplos de trabalho sobre processos de degradação (continuação)

Resumo do trabalho	Ferramentas e técnicas utilizadas
Son et al. (2013) apresentar um modelo probabilístico para calcular a degradação e estimar a vida residual de um componente. Utiliza dados do <i>Prognostic Health Management (PHM) Challenge</i> 2008.	Processo de Wiener
Jin, Matthews e Zhou (2013) apresentaram um modelo probabilístico para a avaliação da degradação e estimação da vida residual de um de baterias de lítio-íons.	Redes bayesianas Processo de Wiener
Ram e Manglik (2014) calcularam a confiabilidade, disponibilidade e MTBF de um sistema composto por três componentes ligados em paralelo por meio de uma abordagem de multiestados (estados degradados).	Cadeia de Markov
Mohammadian, Aït-kadi e Routhier (2010) propuseram uma abordagem prática para conduzir testes de degradação acelerada em amostras novas e usadas disponíveis.	Testes acelerados
Castet e Saleh (2010) calcularam a confiabilidade de satélites através de uma abordagem de multiestados (estados degradados) usando estimador de Kaplan-Meier e MLE em uma distribuição de Weibull e usando uma rede de Petri.	Estimador Kaplan-Meier, Distribuição de Weibull Estimativa por máxima verossimilhança (MLE) Redes de Petri

Fonte: O autor.

Como pode ser visto, existem inúmeras formas de modelar os processos de degradação. Gorjian *et al.* (2009) procura mostrar diferentes abordagens para modelar os processos de degradação. O Quadro 3.5 mostra os modelos de degradação e suas potenciais aplicações.

Quadro 3.5 - Tipos de abordagem para modelar processos de degradação

Tipo de abordagem	Detalhes
Abordagem baseada na experiência ( <i>experienced-based approach</i> )	Forma mais simples de prognóstico. Baseia-se na distribuição de dados (Exponencial, Weibull, Log-normal) obtidos a partir de sistemas técnicos idênticos. Pode ser utilizada quando existe dados históricos de falhas e reparos.
Abordagem baseada em modelos ( <i>model-based approach</i> )	Utiliza modelos matemáticos dinâmicos como modelos de crescimento de trinca. Pode ser usado modelos estatísticos redes bayesianas para estimar a função de densidade de probabilidade de um estado, e assim prever o tempo de evolução de uma falha ou de um dano de fadiga.
Abordagem baseada em dados ( <i>data-driven approach</i> )	Baseia-se em técnicas estatísticas e de aprendizagem que vêm a partir da teoria de reconhecimento de padrões. Redes neurais e Cadeias Ocultas de Markov ( <i>Hidden Markov Models</i> ) são duas abordagens típicas que são amplamente aplicados em prognósticos.
Abordagem baseada em conhecimento ( <i>knowledge-based approach</i> )	Geralmente usados quando os modelos matemáticos que descrevem o fenômeno são difíceis de serem obtidos ou sua limitação tem significância relativamente alta. São muitos utilizados no diagnóstico de falhas. Lógica <i>fuzzy</i> , redes neurais e sistemas especialistas são exemplos de ferramentas utilizadas nesta abordagem.

Fonte: Adaptado de Gorjian *et al.* (2009).

### 3.5 Considerações finais

Assim, este capítulo mostrou informações relevantes para a compreensão dos processos de degradação e servir de base para o tipo de informação que deve ser extraída dos sistemas técnicos.

Para compreender os processos de degradação que afetam um sistema técnico, é preciso conhecer as condições na qual o mesmo está inserido. Para tanto, pode-se identificar parâmetros operacionais (temperaturas do processo, frequência operacional, tipo de manutenção), condições ambientais (salinidade do ambiente, umidade, presença de contaminantes), requisitos de projeto (uso de redundâncias, sistemas de controle e monitoramento) (HOKSTAD *et al.*, 2010).

Estes parâmetros podem mudar ao longo do tempo, fato este que pode acelerar o mecanismo de degradação ou mesmo levar a aparição de outros. Por exemplo, o aumento de contaminantes sólidos pode resultar em uma rápida erosão da bomba, válvulas e tubulações.

Muitas falhas de sistemas técnicos podem ser atribuídas a um processo de degradação. Os sistemas técnicos falham quando o seu nível de degradação atinge um limite especificado.

No entanto, a definição deste limite nem sempre está clara. Em situações reais e aplicações industriais este limite é requisito importante para a estimativa de vida útil residual dos sistemas técnicos, fornecendo informações mais acuradas da confiabilidade dos sistemas técnico. Além disso, a degradação é um tipo de processo estocástico, sendo assim, podendo ser modelada em várias abordagens (GORJIAN et al., 2009, p. 381).

A partir das revisões feitas nos Capítulos 2 e 3, no capítulo seguinte será apresentada a proposta de análise de falhas no presente trabalho, que tem por objetivo mostrar de maneira sistemática como proceder para identificar, caracterizar e agir sobre os processos de degradação de sistemas técnicos.

## 4 PROPOSTA DA SISTEMÁTICA PARA ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO DE SISTEMAS TÉCNICOS

### 4.1 Introdução

Como mostrado os processos de degradação têm grande influência no desempenho funcional do sistema técnico. Assim, este capítulo tem por objetivo apresentar a proposição da **Sistematização para Análise de Degradação de Sistemas Técnicos (SisAD)**.

Esta sistemática foi desenvolvida para contribuir com informações para o ciclo de vida de projeção e também para as ações de manutenção e operação dos sistemas. A SisAD objetiva contribuir com o estudo de sistemas técnicos por meio da análise de falhas de seus itens, qual seja, subsistema e componentes, no que tange os processos de degradação nestes sistemas técnicos.

A Figura 4.1 mostra a relação da SisAD com o Processo de desenvolvimento integrado de produtos – PRODIP (Back *et al.*, 2008) e o uso.

Figura 4.1- Relação da SisAD com modelo PRODIP e o uso



Fonte: O autor.

### 4.2 Sistemática proposta (SisAD)

A partir da revisão da literatura (tais como: artigos científicos, teses e dissertações no âmbito de confiabilidade, manutenibilidade e análise de falha), percebeu-se que o estudo da falha acontece em três grandes etapas. A primeira consiste na compreensão do objeto de estudo, a segunda no entendimento de como e o porquê a falha acontece e, por último, na proposição de ações para resolução do problema.

Durante a revisão dessas fontes, percebeu-se, ainda, que apesar de ter várias formas de modelar os processos de degradação, muitos destes têm um enfoque matemático (ver Quadro 3.4) e não tratam do processo

de sistematização de “o que fazer” e “como transferir o conhecimento gerado destes processos”, apenas “como fazer”.

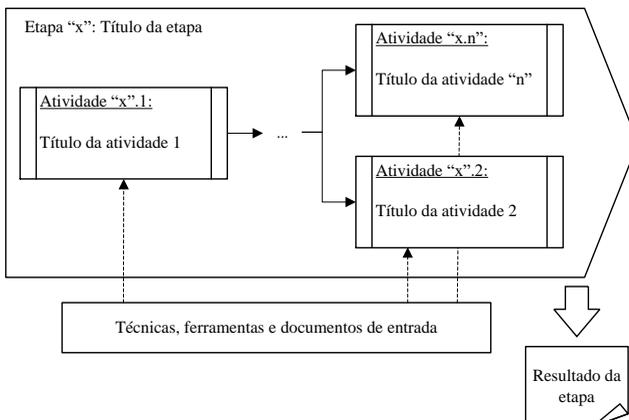
As etapas da SisAD basearam-se na organização do processo de análise de falha. Logo após, procurou-se identificar técnicas mais apropriadas para cada uma dessas etapas.

Com base nas técnicas revisadas (Análise Funcional, FMEA, FTA, CNEA, Cadeia de Markov) foram, então, propostas as atividades para cada uma das etapas. Estas técnicas foram selecionadas para proporcionar o entendimento do funcionamento do sistema (Análise Funcional), identificação das causas e efeitos das falhas (FMEA), elucidação da rede causal das falhas (FTA), quantificação das falhas ou dos cenários de falhas (FTA e Cadeia de Markov) e visualização das ações na forma de barreiras para mitigar as causas dos modos de falhas e/ou dos efeitos das falhas (CNEA).

Em seguida, procurou-se um refinamento da estrutura. Para tanto, por meio reuniões e discussões com pesquisadores da área de estruturação de metodologias e da área de confiabilidade e manutenibilidade pôde-se ajustar o conteúdo da SisAD.

Para a compreensão dos elementos contidos nas figuras apresentadas na sistemática, um modelo de referência é apresentado na Figura 4.2, utilizado para representar cada etapa, sendo identificado um número  $x$  e um título contendo uma breve descrição na parte superior da figura. Este modelo foi adaptado de Sakurada (2013) que desenvolveu uma metodologia para análise de confiabilidade dinâmica.

Figura 4.2 - Modelo de referência para cada etapa utilizado para orientar as etapas da SisAD

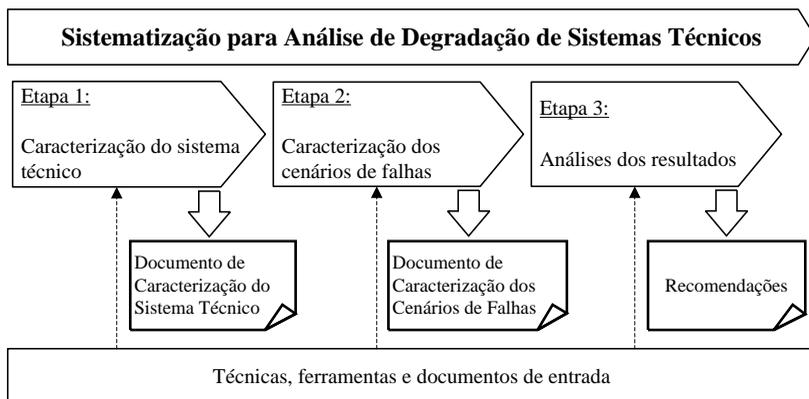


Fonte: Adaptado de Sakurada (2013).

O modelo de referência (Figura 4.2) foi desenvolvido para organizar as ações em Etapas ( $x_i$ ). Nestas etapas tem-se atividades ( $x_{i,n}$ ) que são desenvolvidas a partir de entradas e saídas de técnicas, ferramentas e documentos. Ao final há uma saída de cada etapa.

A SisAD se divide em três etapas: caracterização do sistema técnico; caracterização dos cenários de falhas; e a análise dos resultados, como apresentado na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Sistemática para análise de degradação de sistemas técnicos



Fonte: O autor.

Na primeira etapa da SisAD é estudado as características do sistema técnico a ser analisado, buscando identificar seus subsistemas e componentes, além da inter-relação entre eles. Logo após vem a Etapa 2 de caracterização dos cenários de falhas, a qual busca-se as informações que permita priorizar por meio do cálculo de taxas de falhas e confiabilidade os subsistemas ou itens de maior relevância em termos das funções desempenhadas e dos processos de degradação.

A Etapa 2 prossegue-se, ainda, com a identificação e caracterização de falhas degradadas do sistema técnico. E por fim, com base nas informações das etapas anteriores, são feitas as análises e são estabelecidas as ações de projeto ou manutenção (Etapa 3).

Todas as etapas são suportadas por documentos (D), técnicas e ferramentas (F) e banco de informações (S) que sustentarão as decisões da equipe que está desenvolvendo a análise e estruturando as decisões. O Quadro 4.1 contém as legendas para os documentos, as técnicas e ferramentas e bancos de informações necessários para a aplicação da sistemática.

Quadro 4.1 - Descrição dos documentos recomendados para a SisAD

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>
D1	Artigos científicos	Literaturas disponíveis para auxílio na coleta e tratamento das informações necessárias.
D2	Catálogos e manuais de fabricantes	Conjunto de documentos encontrados a fabricantes de sistemas técnicos.
D3	Documento de garantia	Documento legal disponível sobre os sistemas técnicos.
D4	Normas vigentes	Conjunto de normativas relacionados ao sistema técnico e suas aplicações.
D5	Relatórios de Manutenção	Documentação elaborados a partir de ações de manutenção.
D6	Documento de caracterização do sistema	Documento que caracteriza o sistema técnico em análise. É a saída da primeira etapa da SisAD (Apêndice A1).
D7	Documento de priorização de análise	Documento que identifica os subsistemas críticos. (Apêndice A2).
D8	Documento de caracterização dos cenários de falha	Documento que caracteriza os processos de degradação identificados no sistema técnico. É a saída da segunda etapa da SisAD. (Apêndice A3)
D9	Recomendações Técnicas	Documento que especifica as recomendações técnicas que devem solucionar os problemas encontrados. É a saída da última etapa da SisAD. (Apêndice A4).
D10	Relatório de <i>Teardown</i> (Desmontagem técnica)	Relatório de desmontagem de sistemas técnicos com o intuito de identificar e caracterizar as partes integrantes do sistema.
D11	Documento de caracterização dos processos de degradação ( <i>Software SisAD</i> )	Documento gerado no <i>software</i> SisAD que contém conhecimento sobre os processos de degradação dos sistemas técnicos. (Apêndice B).

Fonte: O autor.

Quadro 4.1 - Descrição dos documentos recomendados para a SisAD (continuação)

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>
F1	Técnicas de Análise de Falhas	Técnicas que permitem caracterizar os processos de degradação presentes nos sistemas técnicos.
F2	<i>Brainstorming</i>	Técnica para estimular a geração de informação sobre um determinado assunto.
F3	Técnicas de análise funcional	Ferramenta que auxilia no desdobramento dos sistemas técnicos, evidenciando as suas funções.
F4	Técnicas de Análise Estatísticas	São ferramentas necessárias ao tratamento dos dados obtidos.
F5	Reuniões de equipe	Reuniões entre os responsáveis pela aplicação da SisAD ou pelo sistema técnico (especialistas) e que devem ser registradas em atas.
F6	Digrama de bloco de confiabilidade	Técnica que permite o cálculo de confiabilidade de sistemas.
S1	Banco de dados de falhas externos	Dados brutos de falhas de sistemas técnicos similares.
S2	Banco de dados de falhas internos	Dados brutos de falhas do sistema técnico em análise.
S3	Banco de dados do sistema de monitoramento	Dados brutos de tempo de operação coletados a partir do sistema de monitoramento do sistema técnico

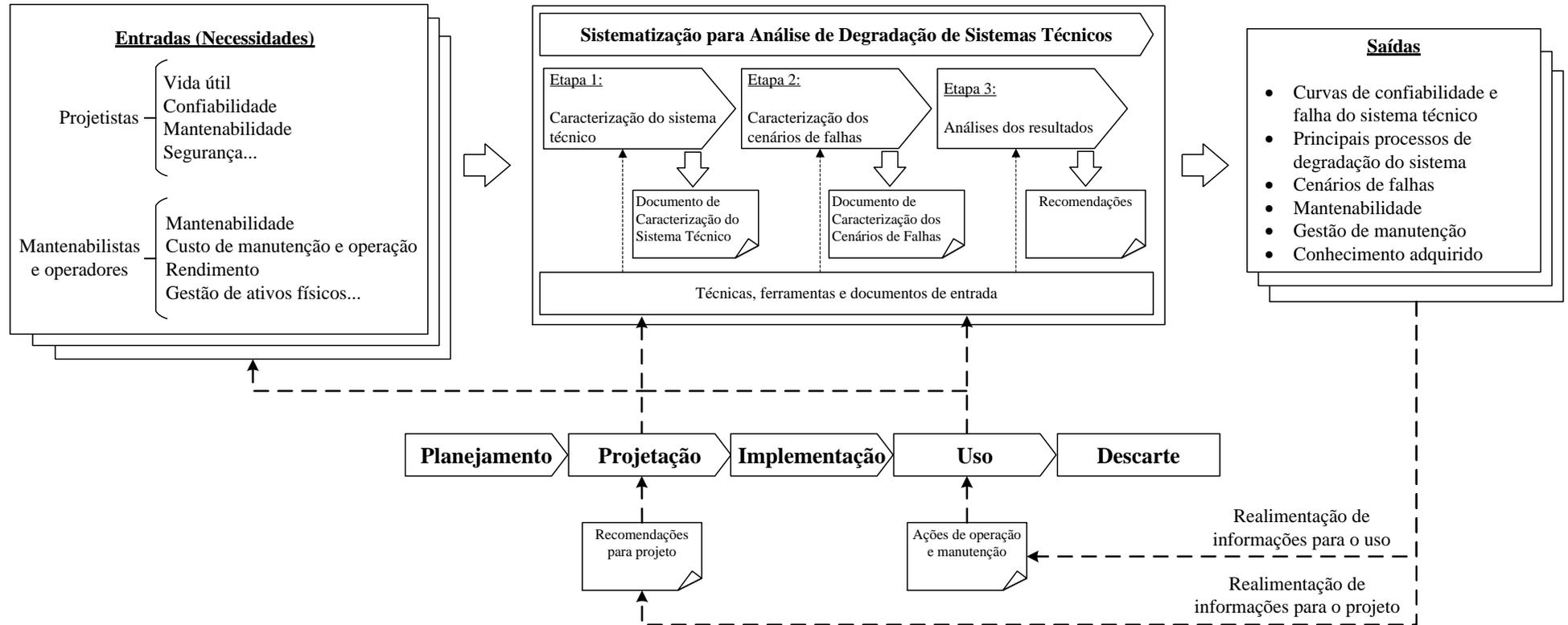
Fonte: O autor.

A Figura 4.4 mostra como a SisAD se relaciona com o ciclo de vida de um sistema técnico. A entrada da sistemática proposta parte de uma necessidade de operadores, mantenedores ou projetistas. Essas necessidades advêm de análise e relatórios de falhas, perda de desempenho do sistema técnico, custos de manutenção, entre outros. As informações utilizadas pela SisAD podem ser extraídas de diversas fases do ciclo de vida do produto, tais como: informações do projeto, taxas de falhas, taxas de reparos, relatórios de manutenção, condições operacionais e normas vigentes. As saídas da SisAD visam dar suporte ao produto no ciclo de vida.

A Figura 4.5 mostra o relacionamento da SisAD com o modelo PRODIP (Back *et. al*, 2008). As informações geradas são organizadas para serem utilizadas nas fases de projeto informacional (parâmetros dos atributos de confiabilidade e manutenibilidade), no conceitual (inserção de sistemas de monitoramento, sistemas redundantes ou novas alternativas de solução) e projeto preliminar (na otimização do produto, diretrizes ou parâmetros para um teste acelerado, entre outros).

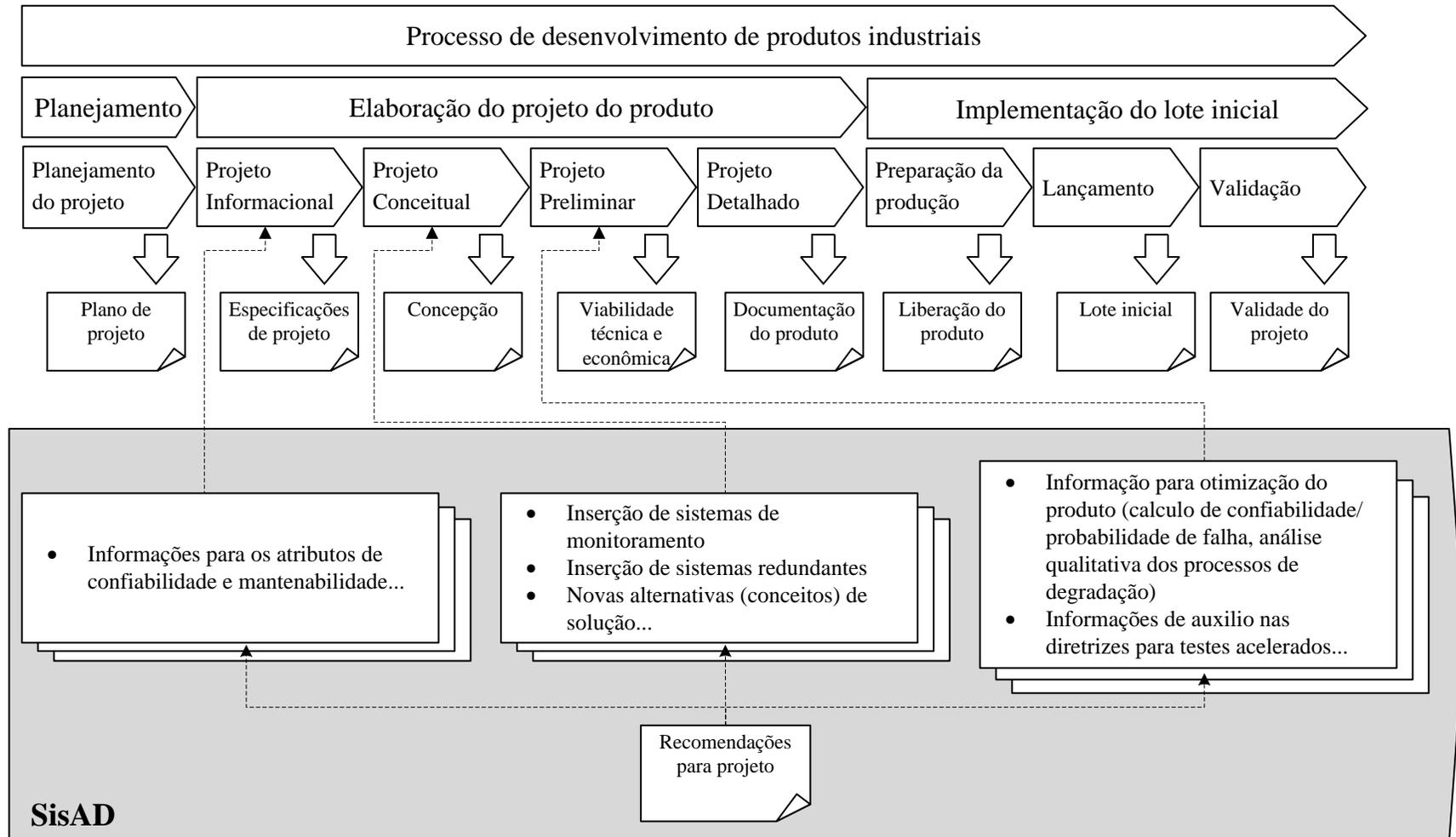
No uso, as saídas podem ser utilizadas para propor mudanças nos planos de operação/manutenção, como: inclusão outros dispositivos de monitoramento, revisar tempos ou parâmetros de inspeções, instalação de sensores, capacitação de pessoal, entre outros.

Figura 4.4 - Interação da SisAD com o ciclo de vida de um sistema técnico



Fonte: O autor.

Figura 4.5 – Interação entre as saídas da SisAD e o modelo PRODIP

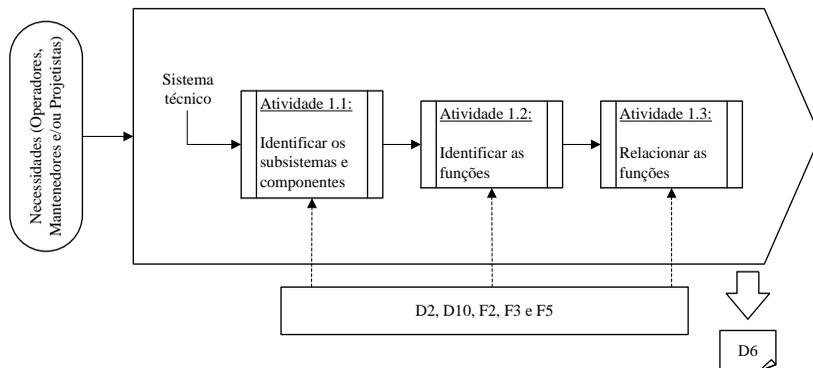


Fonte: O autor.

#### 4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA TÉCNICO

Esta etapa consiste em três atividades básicas, que são: identificar os subsistemas e componentes; identificar as funções e relacionar as funções. A Figura 4.6 mostra a etapa. É importante frisar que, caso estas informações já estejam disponíveis, deve-se avançar para a próxima etapa, caso contrário segue-se com as atividades propostas.

Figura 4.6 - Etapa de Caracterização do sistema técnico



Fonte: O autor.

A Atividade 1.1 consiste no desdobramento do sistema técnico, ou seja, em dividi-lo em subsistemas, componentes e itens. Estas informações podem ser conseguidas, por exemplo, por meio catálogos e manuais de fabricantes (D2), relatórios de *Teardown* (D10), conhecimentos de especialistas e sistemas similares.

As outras duas atividades da etapa constituem-se, basicamente, de identificar as funções parciais e elementar em nível de subsistemas. O uso de técnicas como: *brainstorming* (F2), técnicas de análise funcional (F3) e reuniões de equipes (F5) ajudam na elucidação do conhecimento já interiorizado do sistema técnico. O Quadro 4.2 mostra uma maneira de associar as funções com subsistemas, componentes e itens.

Estas atividades da Etapa 1 são muito importantes, uma vez que estarão relacionadas com a definição de falha funcional do sistema, tanto para falha crítica como para falha degradada.

Na saída desta etapa tem-se o sistema organizado por subsistemas e componentes, suas funções e seus relacionamentos. Esta saída constitui do Documento de Caracterização do Sistema Técnico (D6) que sumariza

as informações coletadas nesta fase e o *layout* deste documento (D6) encontra-se no Apêndice A1.

Quadro 4.2 - Formalização do documento de análise funcional e o desdobramento das suas funções.

<b>Desdobramento das funções do Sistema Técnico</b>				
<b>Sistema:</b> <i>Função global do sistema</i>				
:	:	<b>Subsistema 1:</b> <i>Função parcial 1</i>		
		<b>Componentes 1.1:</b> <i>Função elementar 1.1</i>		
		<b>Componentes 1.2:</b> <i>Função elementar 1.2</i>		
		:	:	
		<b>Componentes 1.i:</b> <i>Função elementar 1.i</i>		
:	:	<b>Subsistema 2:</b> <i>Função parcial 2</i>		
		<b>Componentes 2.1:</b> <i>Função elementar 2.1</i>		
		<b>Componentes 2.2:</b> <i>Função elementar 2.2</i>		
		:	:	
		<b>Componentes 2.i:</b> <i>Função elementar 2.i</i>		
:	:	<b>Subsistema k:</b> <i>Função parcial k</i>		
		<b>Componentes k.1:</b> <i>Função elementar k.1</i>		
		<b>Componentes k.2:</b> <i>Função elementar k.2</i>		
		:	:	
		<b>Componentes k.j:</b> <i>Função elementar k.j</i>		

Fonte: Adaptado de Dias (2013).

Esta organização é importante para facilitar a caracterização das funções de cada um dos itens constituintes do sistema técnico, além de ser o início do processo de análise de falhas.

Vale salientar que, principalmente, as Atividades 1.2 e 1.3 podem tornar-se demasiadamente demorada e levar a uma dispersão do real objetivo da sistemática. Por exemplo, caso o sistema seja muito complexo (composto por muitos subsistemas e componentes), manter um desdobramento até o nível de funções parciais, e após a identificação dos sistemas críticos (Atividade 2.4 da Etapa 2) progredir então para níveis mais baixos.

## 4.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS DE FALHAS

Esta etapa consiste em sete atividades básicas, propostas na Figura 4.7. O objetivo centra-se na racionalização dos esforços, buscando identificar as partes mais importantes do sistema e determinar os principais processos de degradação presentes no sistema técnico.

No entanto, antes se dar prosseguimento com a análise deve-se estabelecer claramente o conceito de falha. Note que dentro da abordagem proposta existem, no mínimo, dois tipos de falhas uma crítica e outra degradada. A falha crítica está relacionada com o não cumprimento da função, já a falha degradada com um estado onde há uma perda parcial da função. Assim deve-se ter claro o limiar entre estas, pois uma falta de clareza pode levar a um cálculo errado das taxas de falhas.

Inicialmente, deve-se buscar dados de falhas do próprio sistema técnico em análise. Estes dados podem ser encontrados em bancos de dados internos (S2), relatórios de manutenção (D5), banco de sistemas de monitoramento (S3). Além dessas fontes, artigos científicos (D1) ou banco de dados de falhas de sistema similares (S1)<sup>3</sup> podem ser consultados. Normalmente, os dados necessitam de tratamento para poder se estimar as taxas de falhas do sistema técnico. Assim, deve-se usar técnicas de análise estatísticas (F4) para o tratamento dos dados.

Depois de calculado as curvas de probabilidade de falha (Atividade 2.3) deve-se, então, priorizar aqueles que se obteve maior probabilidade de falha por degradação (Atividade 2.4).

Note que a indisponibilidade de dados do sistema técnico, também leva à priorização (Atividade 2.4). No entanto, esta priorização assume um caráter mais qualitativo e deve ser realizada com base na experiência da equipe que está utilizando a sistemática por meio de reuniões de equipes (F5) e consultas a outros especialistas no sistema técnico ou em sistemas similares.

O resultado desta priorização deve ser documentado, como por exemplo, o Documento de Priorização de Análise (D7) que serve como uma sugestão de estruturação. Este documento pode ser visto no Apêndice A2.

Após a priorização, são aplicadas as técnicas de análises de falhas (F1). Como relatado anteriormente, foram selecionadas para o SisAD

---

<sup>3</sup> Podem ser encontrados em diversas fontes, como: OREDA, RAC (*Reliability Analysis Center*), IEEE *Standard Reliability Data for Pumps and Drivers, Valve Actuators, and Valves*, AIChE (*American Institute of Chemical Engineers*), NPRD (*Nonelectronic Parts Reliability Data*), entre outros.

técnicas de análise de falha que servem para caracterizar os processos de degradação presente no sistema técnico.

As Atividades 2.5 e 2.6 consistem na aplicação do FMEA nos sistemas priorizados. O FMEA será facilitado utilizando Documento D6, uma vez que neste documento já estão listados os subsistemas, componentes e itens e suas funções.

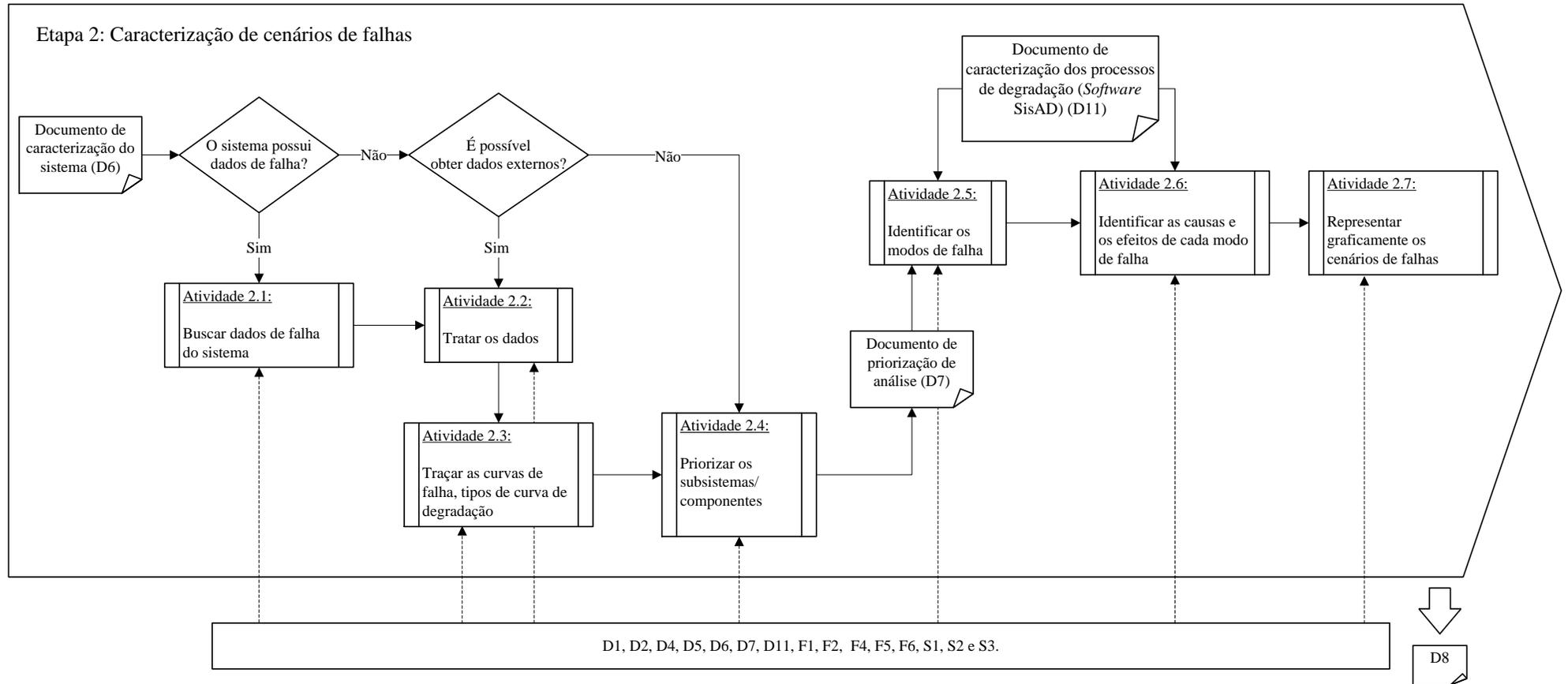
Com a aplicação do FMEA, os projetistas ou mantenedores tornam-se capazes de perceber as causas dos modos de falhas e identificar ações que possam mitigar ou eliminar estas causas. Da mesma forma, os efeitos os levarão a utilizarem recomendações de fabricação, montagem, transporte, uso e descarte dos sistemas técnicos, para prevenir dos efeitos dos mesmos, por exemplo em relação ao ambiente.

Outro documento de entrada para as Atividades 2.5 e 2.6 constitui do Documento de Caracterização dos Processos de Degradação (D11). Este documento atua como um facilitador, um documento de suporte, para o entendimento dos processos de degradação. O documento D11 está estruturado na forma de uma planilha, *software* SisAD (ver Apêndice B), o qual foi idealizado para armazenar o conhecimento dos processos de degradação dos sistemas técnicos. O intuito do *software* é essa forma de registro possibilite examinar as ocorrências de falhas e assim, facilitar ações para mitigar as causas.

A Atividade 2.7 consiste na evidenciação da rede causal das falhas. Com a aplicação do FTA é possível relacionar os eventos entre causas e efeitos e, portanto, visualizar os principais eventos que levam as falhas, além de ser possível estimar a probabilidade de ocorrência destas falhas.

O CNEA também pode ser aplicado na Atividade 2.7, para os modos de falhas mais significativos no ponto de vista da severidade, por exemplo. Assim, servindo para mostrar a rede causal evidenciando as ligações entre o mecanismo de degradação, as causas e suas consequências. Em ambos os lados, jusante ou montante, do modo de falha pode-se determinar barreiras para mitigar causas ou consequências das falhas.

Figura 4.7 - Etapa de Caracterização dos cenários de falhas



Fonte: O autor.



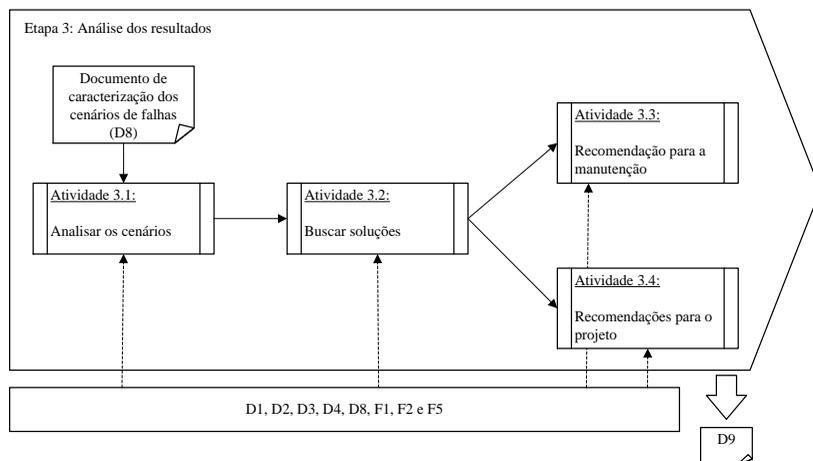
Para que a Etapa 2 de (Caracterização dos Cenários de Falhas) possa ser realizada com objetividade, a etapa anterior (Etapa de caracterização do sistema técnico) é importante, pois visa externalizar o conhecimento do sistema técnico. Portanto, há que se ter um especialista no sistema técnico para ajudar na definição dos sistemas, componentes e respectivas funções.

O resultado desta etapa é o Documento de Caracterização dos Cenários de Falhas (D8). Neste documento é registrado todas as informações geradas pela etapa e o *layout* do documento pode ser observado no Apêndice A3.

### 4.2.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta etapa, são avaliados os resultados obtidos nas etapas anteriores de modo a propor soluções as principais causas que levam a degradação do sistema técnico. A Figura 4.8 mostra de forma geral esta etapa.

Figura 4.8 - Análise dos resultados



Fonte: O autor.

A Atividade 3.1 (Analisar os Cenários) consiste na avaliação das informações e conhecimentos gerados nas etapas anteriores. Com base no documento de caracterização dos cenários de falhas (D8), deve-se procurar apontar os mecanismos de degradação e as causas que levam ao aumento da degradação. Além disso, ainda se pode identificar parâmetros operacionais, condições ambientais e requisitos de projeto relacionados

com esses mecanismos e causas. Ainda na Atividade 3.1 pode-se fazer um tratamento quantitativo das informações, com a aplicação de Cadeias de Markov, por exemplo.

Já Atividade 3.2 (Busca de Soluções) procura encontrar soluções para os cenários analisados na atividade anterior. Essa busca de solução pode ser realizada em artigos científicos (D1), catálogos e manuais de fabricantes (D2), consulta aos especialistas do sistema técnico ou outros que tiveram experiências similares para os processos de degradação observados e caracterizados nas etapas e atividades anteriores.

Após a realização dessas atividades pode-se seguir um dos dois caminhos: solução em nível de projeto ou a nível de manutenção do sistema técnico, que correspondem as Atividades 3.3 e 3.4.

A Atividade 3.3, a partir do conhecimento técnico do sistema em análise, das taxas de falhas, taxas de recolocação, e da análise dos cenários de falhas por degradação, objetiva organizar o plano de ações a de manutenção, como: determinar os procedimentos de manutenção, a periodicidade da manutenção, novos parâmetros de controle do sistema, requisitar ferramentas a serem implementadas, capacitações, e treinamentos da equipe de manutenção e assim por diante. Uma das técnicas que pode ajudar nos procedimentos é o CNEA ou metodologia de gestão da manutenção proposta por Fuentes (2006).

A Atividade 3.4 visa apresentar as ações a serem desenvolvidas no projeto ou reprojeto do sistema técnico. Dependendo do nível de reprojeto, há de revisitar a fase do informacional, conceitual ou preliminar.

Apesar de toda essa informação estar disponível, por muitas vezes, estas não se encontram em uma forma estruturada, o que dificulta a sua aplicação. Assim, torna-se necessário um plano de recomendações bem definido e estruturado. Um documento de Recomendações Técnicas (D9) tem a função de estruturar todo o conhecimento gerado. O *layout* do documento D9 é apresentado no Apêndice A4.

### **4.3 Considerações finais**

Como apresentado a sistemática tem o objetivo de mapear o sistema técnico com a intenção de elucidar as principais causas de falhas por degradação e, assim, fomentar a busca de soluções para tal problema.

A sistemática foi elaborada a partir de uma estruturação lógica para capturar as informações mais relevantes do sistema técnico. Para tanto, na SisAD é utilizado técnicas e ferramentas que se julga adequadas no levantamento de tais informações e constitui-se de uma ação integrada ao

modelo PRODIP, principalmente nos atributos de confiabilidade e manutenibilidade. Fora isso, tem-se informações dos processos de degradação e para tanto pode-se colher informações requeridas para calcular a taxa de falha nas diferentes fases do ciclo de vida, planejar as ações de manutenção e, quando for o caso, rever o projeto para atualizações técnicas ou encaminhá-lo para o descarte.

Vale ressaltar que a aplicação da SisAD, pelo volume de informações requeridas e pelo uso de diferentes tipos de técnicas, necessita de uma equipe multidisciplinar com conhecimento nas técnicas empregadas e no sistema técnico analisado.

Como uma forma de avaliar se a sistemática desenvolvida é clara e produz os resultados esperados apresenta-se, no próximo capítulo, um exemplo de aplicação e avaliação proposta para a SisAD.



## 5 APLICAÇÃO DA SISAD

Com o intuito de compreender e avaliar a sistemática de análise de falha SisAD, propõe-se fazer neste capítulo uma aplicação sobre um sistema hidráulico genérico e uma avaliação. A escolha de um sistema hidráulico ocorreu devido o sistema a ser apresentado tem-se informações sobre os mecanismos de falhas, modos de falha, causas e efeitos. Com isso, deseja-se clarear a aplicação de análise de degradação e gestão de projeto ou de manutenção para os itens presentes no sistema em análise.

### 5.1 Contextualização da aplicação

#### 5.1.1 SISTEMAS HIDRÁULICOS

Conforme definido por Linsingen (2003), um sistema hidráulico (SH) é um conjunto de elementos físicos convenientemente associados que, utilizando um fluido como meio de transferência de energia, permite a transmissão e controle de forças e movimento.

Os SH são aplicados em praticamente todos os ramos da engenharia: maquinarias agrícolas e de terraplanagem, hidráulica industrial, em aplicações navais, aeronáutica, geração de energia elétrica entre outras; isso ocorre devido a algumas vantagens, como a versatilidade de sua configuração e a precisão no controle de dispositivos mecânicos pesados (LINSINGEN, 2003).

Existem dois tipos de SH: os sistemas de potência (*fluid power system*) e os sistemas de transporte (*fluid transport system*). Os primeiros são desenvolvidos especificamente com objetivo de realizar trabalho, onde o trabalho é obtido por meio de um fluido sob pressão agindo sobre um cilindro ou motor, o qual produz a ação mecânica desejada. Os sistemas de transporte de fluidos têm por objetivo a transferência de um fluido de um local para outro, visando alcançar uma determinada finalidade prática, como: estações de bombeamento para água, redes de distribuição de gás para uso industrial, comercial e residencial e processamentos químicos envolvendo a combinação de vários fluidos (DE NEGRI, 2001).

#### 5.1.2 FALHAS EM SISTEMAS HIDRÁULICOS

Em função da aplicação e da importância de SH, a falha pode ocorrer com consequência na segurança humana, ambiental, na continuidade da função ou na parada do sistema técnico. Por outro lado,

os SH são robustos e poucas falhas ocorrem ao longo de um ciclo de vida, o que pode produzir excesso de confiança.

Contudo, dado a importância dos SH para várias aplicações, muitos autores têm empreendido pesquisas para sistematizar as falhas em SH com o intuito de melhorar os procedimentos metodológico de elaboração de projeto e os procedimentos de uso e manutenção para garantir vida sem falhas ao SH. A exemplo disto podem ser citados os trabalhos de:

- Silva (1998) que propôs um sistema especialista para projeto de sistemas hidráulicos focando em aspectos de engenharia simultânea;
- Alves (2001) que propôs um sistema especialista para o diagnóstico de falhas em um sistema hidráulico naval;
- OREDA (2002) se constitui num banco de dados de falhas resultante de um programa iniciado pela *Norwegian Petroleum Directorate* (agora, *Petroleum Safety Authority*) em 1981 para avaliar e melhorar a segurança e confiabilidade na indústria de Óleo & Gás (produção e exploração).
- Vinadé (2003) que propôs um sistema especialista para a sistematização do processo de projeto para confiabilidade e manutenibilidade aplicado a sistemas hidráulicos com aplicação em sistemas auxiliares de geração hidrelétrica;
- Porciúncula (2009) que desenvolveu uma metodologia para a análise de confiabilidade em sistemas automáticos, com vistas a estimar o ciclo de vida;
- Mendonza (2013) que propôs uma sistematização do projeto de sistemas hidráulicos com o uso de fluidos biodegradáveis, por meio da especificação e análise dos requisitos de sistemas hidráulicos, com o intuito de adequar e otimizar o desempenho e a vida útil dos componentes assim como do próprio fluido.
- Ramos e de Negri (2013) propuseram um modelo matemático para a detecção de falhas em válvulas servo-proporcionais;
- Sakurada (2013) propôs uma metodologia para análise de confiabilidade dinâmica e aplicou em um sistema hidráulico de governo de um navio petroleiro;
- Zanon (2014) trabalhou a detecção de falhas em válvulas distribuidoras através de um modelagem e simulação.

Para se diagnosticar falhas em sistemas hidráulicos se sugere uma sequência lógica de procedimentos quando se observam operações impróprias do atuador hidráulico ou sintomas de aviso. Sintomas de aviso

estão relacionados a temperaturas excessivas, vazamentos de óleo, vibração e ruído. Ao percebê-los junto a um componente, há uma grande probabilidade de se encontrar a origem da falha ou do mal funcionamento. Por exemplo, um ruído na bomba pode ser devido à cavitação causada por uma obstrução da entrada do filtro ou uma lenta saída do atuador pode ser devido à alta viscosidade do fluido (VINADÉ, 2003).

Parte dos problemas, ou falhas, encontrados em sistemas hidráulicos estão relacionados ao óleo hidráulico. Desta forma, manter o controle e eliminar os modos de falha do fluido evita um maior número de efeitos indesejáveis no sistema (RAVI e ANDREIS, 2005). De acordo com Dias (2012), tipicamente 85 a 95% de falha em bombas podem ser atribuídas: a formação de bolhas e aeração; cavitação; contaminação; oxidação no fluido; pressurização elevada ou viscosidade inadequada.

### 5.1.3 PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO EM SISTEMAS HIDRÁULICOS

Conforme Dias (2012, p. 487), os processos de degradação encontrados em SH dão-se por abrasão, erosão, adesão, cavitação, corrosão e fadiga. A maioria destes mecanismos estão relacionados com a contaminação do fluido do SH.

Os contaminantes são partículas sólidas, líquidos ou gases. A maioria dos contaminantes sólidos podem causar uma ação abrasiva. O Quadro 5.1 apresenta tipos de contaminantes e possíveis danos que podem gerar.

Quadro 5.1- Contaminantes de SH e suas consequências

<b>Contaminante</b>	<b>Possível dano gerado</b>
Sujeira	Interfere na formação do filme de óleo lubrificante
	Inserção de partículas abrasivas
	Falha por fadiga em mancais de rolamento devido a entalhes causados pelas partículas.
Água (umidade)	Formação não uniforme da película de óleo
	Provoca oxidação (ferrugem)
	Causa hidrólise e formação de ácido
Resíduos da manufatura do componente	Ser arrastado pelo fluido e causar ranhuras, riscos.
Produtos químicos	Oxidação do óleo lubrificante e corrosão
Partículas provenientes do desgaste dos componentes	Leva a degradação do óleo lubrificante
	Desgaste da pista de rolamentos (mancais de rolamento)

Fonte: Adaptado de Totten, Will e Feldmann (2001, p. 282).

Quadro 5.1- Contaminantes de SH e suas consequências (continuação)

Contaminante	Possível dano gerado
Fluido	Se a viscosidade é muito baixa, película de óleo é muito fina o que pode aumentar o atrito entre as partes.
	Se a viscosidade for alta, a eficiência da bomba diminui devido a cavitação.
Outros fluidos	Se os aditivos usados não forem adequados, pode elevar a probabilidade de corrosão, atrito e desgaste. Se for contaminado com ar pode provocar cavitação.

Fonte: Adaptado de Totten, Will e Feldmann (2001, p. 282)

Com a contaminação, o SH apresenta vários efeitos, como: um desempenho insatisfatório, perda de potência, controles com capacidade reduzida, choques hidráulicos com aumento e queda de pressão, vazamentos internos, elevação da temperatura e riscos de acidentes. Parker (1999, p. 203) mostra que a formação destes contaminantes ocorre, em grande parte, da seguinte forma:

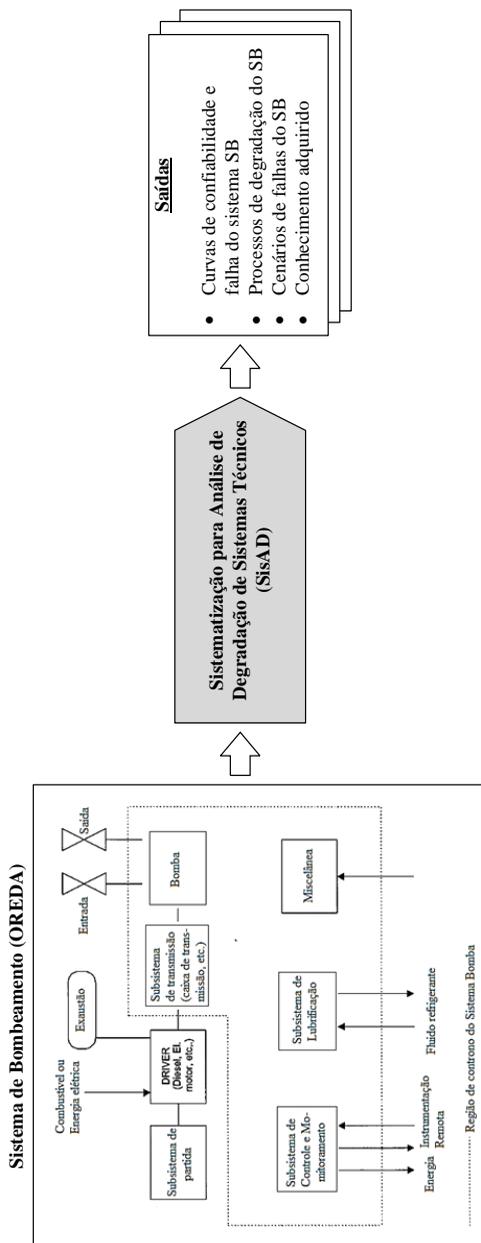
- Incorporados nos processos de fabricação dos componentes;
- Incorporados durante a montagem do sistema;
- Incorporados no fluido hidráulico ou durante o abastecimento;
- Introduzidos durante a manutenção, cada vez que o circuito é aberto;
- Entram pelo filtro de ar;
- Contaminantes resultantes da degradação dos componentes.

## 5.2 Estudo de caso: aplicação da SisAD em sistemas hidráulicos

Com base no exposto acima, foi aplicado a SisAD um problema teórico em sistemas hidráulicos utilizando como base de dados as informações contidas no OREDA (2002). Para este exemplo, será realizado pensando nas ações manutenção referentes ao sistema.

A Figura 5.1 representa a interação do Sistema de Bombeamento (SB) com os resultados esperados na saída da SisAD. Cada um dos subtópicos abaixo representa cada uma das etapas apresentadas na SisAD. De acordo com o OREDA (2002), esse sistema é aplicado em uso geral e para sistemas combate a incêndio.

Figura 5.1 - Interação do Sistema de Bombeamento com a SisAD

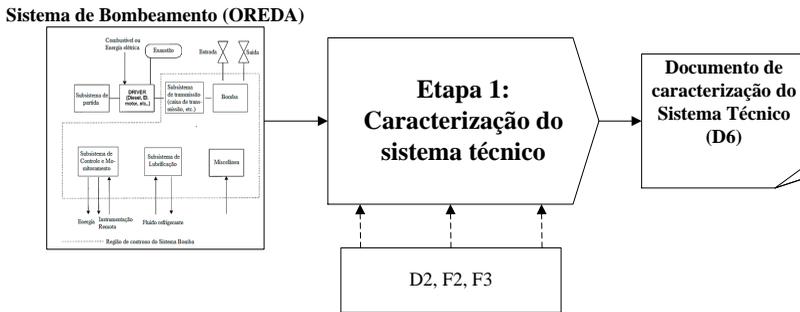


Fonte: O autor

### 5.2.1 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA TÉCNICO

A Figura 5.2 mostra a relação do Sistema de Bombeamento do OREDA e a primeira etapa da SisAD. As informações do Sistema de Bombeamento (SB) servem como a entrada para etapa tendo como resultado o sistema caracterizado na forma de um documento (D6) que será utilizado como entrada da Etapa 2.

Figura 5.2 - Etapa 1: entrada das informações do SB e saída do SB caracterizado

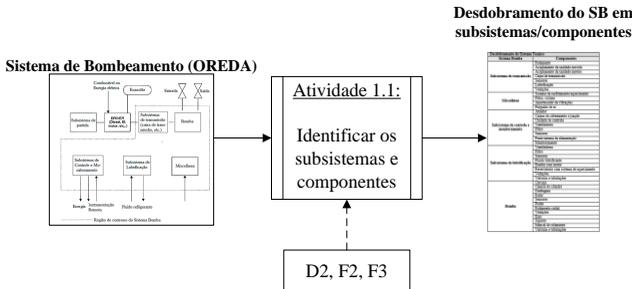


Fonte: O autor.

#### 5.2.1.1 Atividade 1.1: Identificar os subsistemas e componentes

O SB é considerado uma unidade hidráulica composta por um conjunto de subsistemas, como visto na Figura 5.1. A partir das informações presente no OREDA (2002), pode-se identificar os subsistemas e componentes do SB. A Figura 5.3 apresenta a entrada e saída dessa atividade e o Quadro 5.2 exemplifica o desdobramento do SB obtido a partir dos dados coletados.

Figura 5.3 - Atividade 1.1: identificação dos subsistemas e componentes do SB por meio das informações coletadas no OREDA (2002)



Fonte: O autor.

Quadro 5.2 – Desdobramento do SB em subsistemas e componentes

<b>Desdobramento do Sistema Técnico</b>	
<b>Sistema de Bombeamento</b>	<b>Componentes</b>
<b>Subsistema de transmissão</b>	Rolamento
	Acoplamento da unidade movida
	Acoplamento da unidade motora
	Caixa de transmissão
	Sensores
	Lubrificação
	Vedações
<b>Miscelânea</b>	Sistema de resfriamento/aquecimento
	Filtro, ciclone
	Amortecedor de vibrações
	Purgador de ar
<b>Subsistema de controle e monitoramento</b>	Atuador
	Caixas de cabeamento e junção
	Unidade de controle
	Ventiladores
	Filtro
	Sensores
	Fonte interna de alimentação
	Monitoramento
<b>Subsistema de lubrificação</b>	Ventiladores
	Filtro
	Sensores
	Fluido lubrificante
	Bomba com motor
	Reservatório com sistema de aquecimento
	Vedações
	Válvulas e tubulações
<b>Bomba</b>	Carcaça
	Camisa do cilindro
	Diafragma
	Rotor
	Sensores
	Pistão
	Rolamento radial
	Vedações
	Eixo
	Suporte
	Mancal de rolamento
Válvulas e tubulações	

Fonte: O autor.

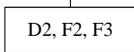
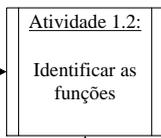
5.2.1.2 Atividade 1.2: Identificação das funções

A partir da saída da Atividade 1.1 e considerando o propósito do SB apresentado no OREDA (2002), pode-se identificar as funções para cada um dos subsistemas, como visto na Figura 5.4. No exemplo, por fim didáticos, optou-se por trabalhar somente no nível de subsistemas, contudo o procedimento pode ser desenvolvido para todos os componentes identificados.

Figura 5.4 - Atividade 1.2: identificação das funções dos subsistemas do SB a partir do Quadro 5.2

Desdobramento do SB em subsistemas/componentes

Subsistema/Componente	Descrição
Sistema de bombeamento	Fornece uma vazão de maneira controlada e dentro de padrões pré-estabelecidos.
Bomba	Converte energia mecânica em energia cinética para o fluido.
Subsistema de transmissão	Adequar os níveis de rotação e torque as necessidades requeridas para o sistema.
Subsistema de controle e monitoramento	Controlar e monitorar a condição dos equipamentos.
Subsistema de lubrificação	Lubrificar o sistema para controle de desgaste, facilitar o movimento e reduzir perdas térmicas.
Miscelânea	Trocar calor, limpar o sistema e amortecer vibração.



Desdobramento do SB em subsistemas/componentes com suas funções

Desdobramento das funções do Sistema Técnico	
<b>Sistema de Bombeamento:</b>	Fornece uma vazão de maneira controlada e dentro de padrões pré-estabelecidos.
<b>Bomba:</b>	Converter a energia mecânica em energia cinética para o fluido.
<b>Subsistema de transmissão:</b>	Adequar os níveis de rotação e torque as necessidades requeridas para o sistema.
<b>Subsistema de controle e monitoramento:</b>	Controlar e monitorar a condição dos equipamentos.
<b>Subsistema de lubrificação:</b>	Lubrificar o sistema para controle de desgaste, facilitar o movimento e reduzir perdas térmicas.
<b>Miscelânea:</b>	Trocar calor, limpar o sistema e amortecer vibração.

Fonte: O autor.

O Quadro 5.3 mostra as funções identificadas para o SB, e este quadro segue o padrão do apresentado no documento D6 apresentado no Apêndice A.1.

Quadro 5.3 - Desdobramento do SB em subsistemas e suas funções

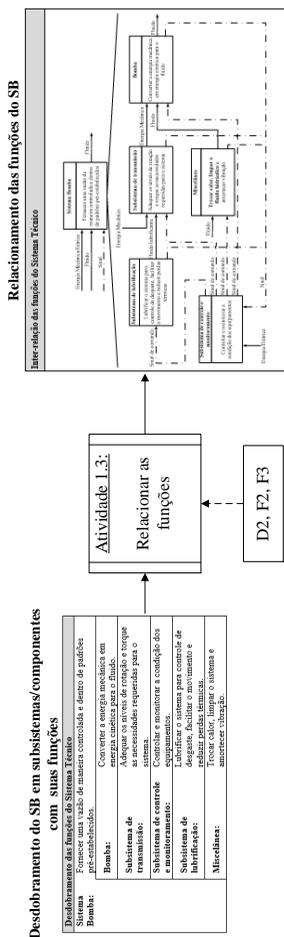
Desdobramento das funções do Sistema Técnico	
<b>Sistema de Bombeamento:</b>	Fornece uma vazão de maneira controlada e dentro de padrões pré-estabelecidos.
<b>Bomba:</b>	Converter a energia mecânica em energia cinética para o fluido.
<b>Subsistema de transmissão:</b>	Adequar os níveis de rotação e torque as necessidades requeridas para o sistema.
<b>Subsistema de controle e monitoramento:</b>	Controlar e monitorar a condição dos equipamentos.
<b>Subsistema de lubrificação:</b>	Lubrificar o sistema para controle de desgaste, facilitar o movimento e reduzir perdas térmicas.
<b>Miscelânea:</b>	Trocar calor, limpar o sistema e amortecer vibração.

Fonte: O autor.

### 5.2.1.3 Atividade 1.3: Relacionar as funções

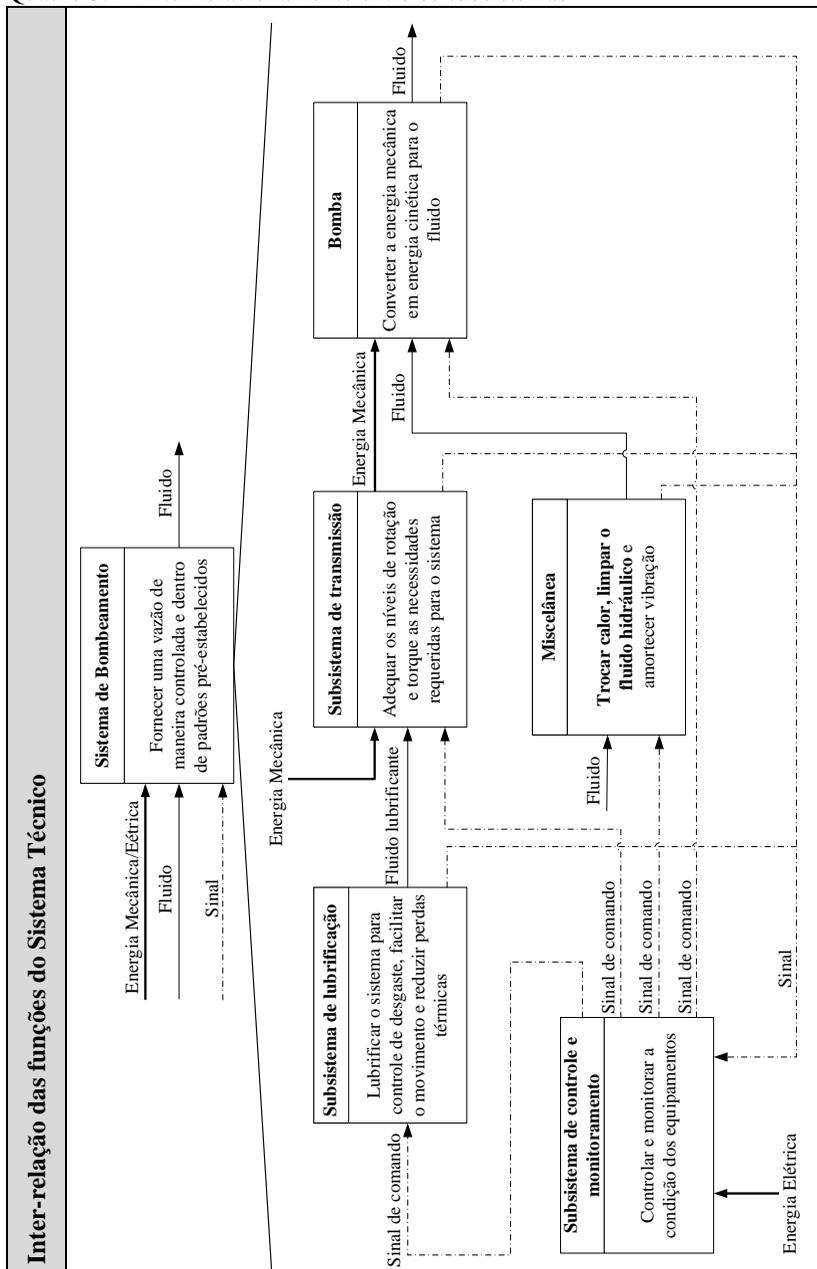
A Figura 5.5 mostra a entrada e saídas para a Atividade 1.3. A entrada dessa atividade constitui o resultado da atividade anterior (Quadro 5.3) e a saída a relação entre os fluxos de sinal, material e energia das funções identificadas de cada subsistema. O Quadro 5.4 mostra o relacionamento entre as funções dos subsistemas do SB e é apresentado na forma do documento D7, como apresentado no Apêndice A.2.

Figura 5.5 - Atividade 1.3: Relacionamento entre o fluxo de energia, material e sinal entre as funções dos subsistemas identificados para o SB.



Fonte: O autor.

Quadro 5.4 - Inter-relacionamento entre os subsistemas

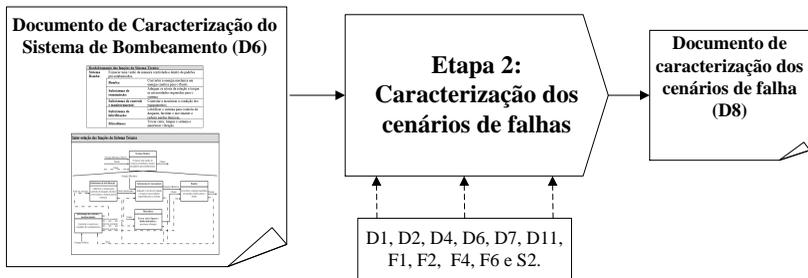


Fonte: O autor.

## 5.2.2 ETAPA 2: CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS DE FALHAS

Com o conhecimento gerado na Etapa 1, pode-se então dar seguimento com a SisAD. A Figura 5.6 apresenta a Etapa 2, cuja entrada corresponde ao documento de caracterização do SB, formado a partir da composição do Quadro 5.3 e do Quadro 5.4, e a saída consiste do documento de caracterização dos cenários de falhas (D8) que é composto das informações geradas ao longo da Etapa 2 e que está organizado seguindo o padrão deste documento localizado no Apêndice A.3.

Figura 5.6 - Etapa 2: caracterização dos cenários de falhas do SB por meio do documento de caracterização do SB

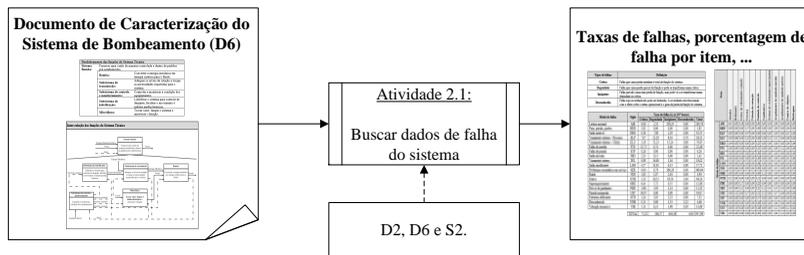


Fonte: O autor.

### 5.2.2.1 Atividade 2.1: Buscar os dados do sistema

Por se tratar de um exercício de aplicação, não se teve acesso a outras fontes, como: bancos de dados internos (S2), relatórios de manutenção (D5), banco de sistemas de monitoramento (S3). Desta maneira, utilizou-se somente os dados presente no OREDA (2002). A Figura 5.7 mostra o documento D6 (entrada para a atividade) e a saída desta atividade, que compreende os dados de taxa de falha e as porcentagens de falha para o SB extraídos dos dados apresentados no OREDA (2002).

Figura 5.7 - Atividade 2.1: dados das taxas de falhas e das porcentagens de falha para o SB obtidos a partir do documento D6 e das informações coletadas

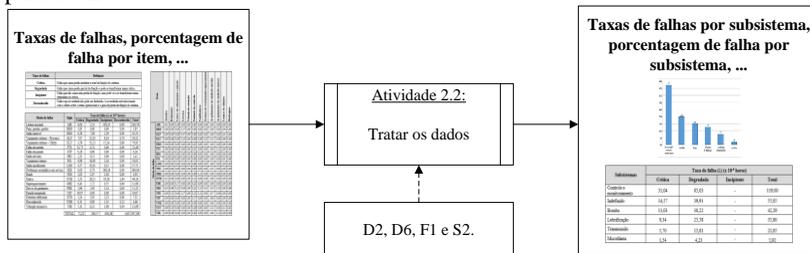


Fonte: O autor.

### 5.2.2.2 Atividade 2.2: Tratamento dos dados

A partir das informações obtidas na atividade anterior é possível se calcular as taxas de falhas e a porcentagem de falhas para cada um os subsistemas. A Figura 5.8 mostra a Atividade 2.2 com sua saída e entrada.

Figura 5.8 - Atividade 2.2: tratamentos dos dados obtidos pela Atividade 2.1 para o SB



Fonte: O autor.

Para o cálculo da taxa de falha, o OREDA (2002) classifica as amostras em quatro tipos de falhas. A definição apresentada pode ser visualizada no Quadro 5.5.

Quadro 5.5 – Definição dos tipos de falhas para o OREDA (2002)

Tipos de falhas	Definição
<b>Crítica</b>	Falha que causa perda imediata e total da função do sistema.
<b>Degradada</b>	Falha que causa perda parcial da função e pode se transformar numa crítica.
<b>Incipiente</b>	Falha que não causa uma perda de função, mas pode vir a se transformar numa degradada ou crítica.

Fonte: Adaptado do OREDA (2002).

Quadro 5.5 – Definição dos tipos de falhas para o OREDA(2002) (continuação)

Tipos de falhas	Definição
<b>Desconhecida</b>	Falha cuja severidade não pode ser deduzida. A severidade está relacionada com o efeito sobre o status operacional e o grau de perda da função do sistema.

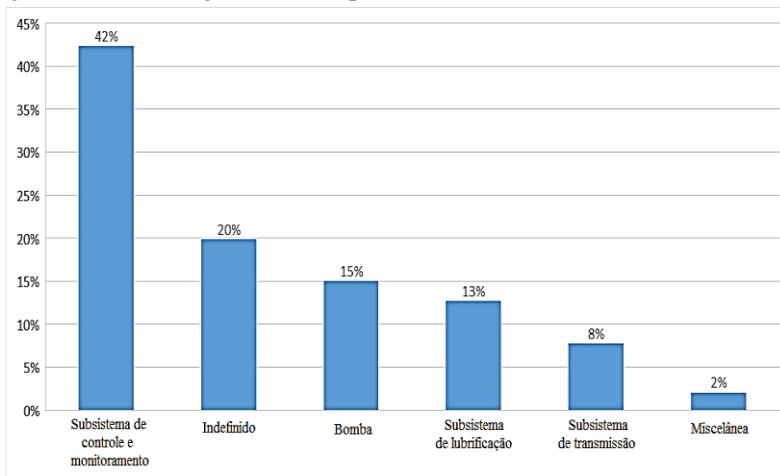
Fonte: Adaptado do OREDA (2002).

Note que existe uma classificação chamada de incipiente. Nessa definição percebe-se que não se trata de uma falha propriamente dita, uma vez que, não há qualquer perda de desempenho do sistema, é apenas um registro de um evento que poderá levar a uma falha (crítica ou degradada).

Este ponto pode ser visto na Figura 1.6 como sendo o primeiro ponto da curva, a partir do qual já é possível a detecção da falha. Além disso, pode ser relacionado com a Figura 1.5 com sendo um dos pontos onde há a primeira percepção da falha, como um aumento de temperatura ou de ruído, por exemplo.

No OREDA (2002, p.176-177) é apresentado a porcentagem das falhas contabilizadas por item, como para o item atuador foi de 1,29% de todas as falhas contabilizadas. Tomando como referência estas porcentagens e no Quadro 5.2 foi possível calcular a porcentagem de falhas para cada subsistema, como visto na Figura 5.9. O Apêndice C mostra detalhadamente como o cálculo das porcentagens de falhas para cada um dos subsistemas.

Figura 5.9 - Porcentagem de falhas por subsistema



Fonte: O autor

Durante o tratamento dos dados, foram identificados três itens (subunidade, desconhecido e outros) que não se podia atribuir a nenhum dos subsistemas identificados anteriormente (bomba, de transmissão, de controle e monitoramento, de lubrificação ou miscelânea), então foi-se atribuído a um outro subsistema denominado de indefinido.

Baseado na Tabela 5.1 que mostra as taxas de falhas por modo de falha (OREDA, 2002, p. 173-175) e a Figura 5.9 foi calculado a taxa de falha para cada tipo de falha de interesse. As taxas de falhas para cada subsistema podem ser vistas na Tabela 5.2, que segue o padrão estabelecido no Documento de Priorização de Análise (D7).

Tabela 5.1 - Taxas de falhas por tipo de falha

Modo de falha	Sigla	Taxa de falha ( $\lambda$ ) (x 10 <sup>-6</sup> horas)				
		Crítí-ca	Degra-dada	Inci-piente	Desco-nhecida	Total
Leitura anormal	AIR	0,00	2,53	238,23	0,00	240,76
Pane, parada, quebra	BRD	3,85	0,00	0,00	0,00	3,85
Saída instável	ERO	0,38	7,88	2,29	0,00	10,55
Vazamento externo – Processo	ELP	7,07	22,20	8,16	0,78	38,21
Vazamento externo – Utility	ELU	3,59	51,23	15,24	0,89	70,95
Falha de partida	FTS	13,75	8,74	0,00	0,00	22,49
Falha de parada	STP	0,26	0,00	0,00	0,00	0,26
Saída elevada	HIO	2,31	0,11	0,00	0,00	2,42
Vazamento interno	INL	0,98	16,00	1,04	0,00	18,02
Saída insuficiente	LOO	4,57	33,01	0,13	0,00	37,71
Problemas secundários em serviço	SER	0,00	8,78	360,26	0,00	369,04
Ruído	NOI	1,03	1,87	2,04	0,00	4,94
Outros	OTH	1,53	26,51	19,56	1,64	49,24
Superaquecimento	OHE	6,41	5,72	0,55	0,00	12,68

Fonte: Adaptado de OREDA (2002).

Tabela 5.1 - Taxas de falhas por tipo de falha (continuação)

Modo de falha	Sigla	Taxa de falha ( $\lambda$ ) (x 10 <sup>-6</sup> horas)				
		Crítica	Degradada	Incipiente	Desconhecida	Total
Desvio de parâmetro	PDE	1,96	5,93	3,34	0,00	11,23
Parada inesperada	UST	19,07	0,00	0,00	0,00	19,07
Parada inesperada	UST	19,07	0,00	0,00	0,00	19,07
Estrutura deficiente	STD	1,24	3,85	2,23	0,00	7,32
Desconhecido	UNK	0,11	0,00	1,33	3,22	4,66
Vibração excessiva	VIB	5,11	6,21	1,98	0,39	13,69

TOTAL	73,22	200,57	656,38	6,92	937,09
-------	-------	--------	--------	------	--------

Fonte: Adaptado de OREDA (2002).

Tabela 5.2 - Taxa de falha para cada subsistema

Subsistemas	Taxa de falha ( $\lambda$ ) (x 10 <sup>-6</sup> horas)			
	Crítica	Degradada	Incipiente	Total
Controle e monitoramento	31,04	85,03	-	116,7
Indefinido	14,57	39,91	-	54,57
Bomba	11,03	30,22	-	41,25
Lubrificação	9,34	25,58	-	34,92
Transmissão	5,70	15,61	-	21,31
Miscelânea	1,54	4,23	-	5,75

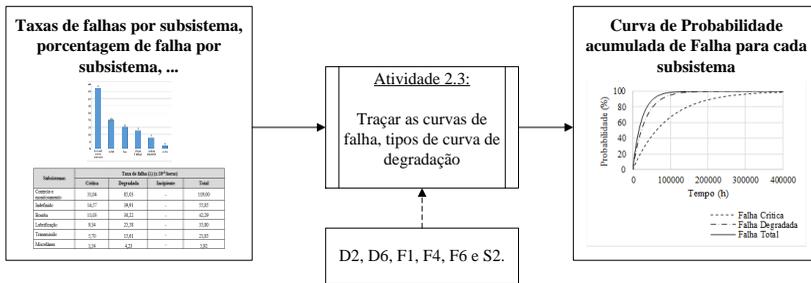
Fonte: Adaptados de OREDA (2002).

Observe que na Tabela 5.2 não é apresentada informações para a taxa incipiente. Isso deve-se pelo entendimento que esse evento não corresponde a uma falha e por isso deve ser desconsiderada para o cálculo das curvas de probabilidade de falha e para a atividade de priorização.

### 5.2.2.3 Atividade 2.3: Traçar as curvas de confiabilidade

Com as saídas da Atividade 2.2, pode-se então estimar as curvas de probabilidade acumulada de falha que constitui a saída da Atividade 2.3. A Figura 5.10 mostra as entradas e saídas da Atividade 2.3.

Figura 5.10 - Atividade 2.3: curvas de probabilidade acumulada de falha para os subsistemas estimada por meio das taxas de falhas calculadas na atividade 2.2



Fonte: O autor.

Por meio das taxas de falhas descritas na Tabela 5.2, pode se estimar as probabilidades acumulada de falha (não confiabilidade), para gerenciar as ações futuras em relação aos processos de degradação e recolocação. Por meio dessas informações os gestores de manutenção têm condições de programar as gestões para manutenção, que vai desde a previsibilidade de peças de reposição, especialidade de pessoal, ferramentas requeridas até plano de parada para levar o item do estado de falha para o estado da condição de tão bom quanto novo, ou quando for o caso, para o estado de descarte, reprojeto ou remanufatura. Um dos usos destas probabilidades na SisAD é a utilização dessa informação para priorização dos subsistemas.

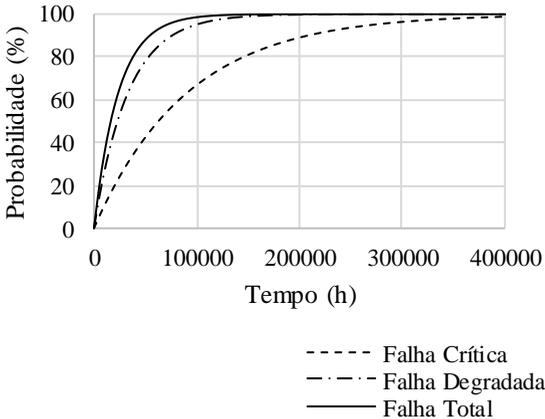
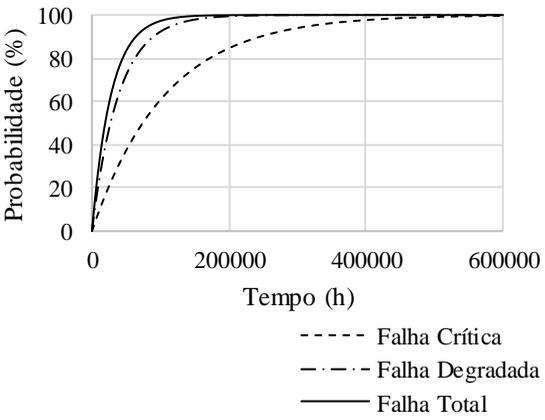
Para estimar as curvas de probabilidade acumulada de falha foi tomado como referência uma distribuição do tipo de exponencial. Dessa forma, pode-se, então, calcular as curvas de probabilidade de falha para cada subsistema. O Quadro 5.6 mostra as curvas para cada subsistema conforme apresentado no documento D7.

Quadro 5.6 - Curvas de Probabilidade de Falha para cada Subsistema com os dados obtidos nos relatórios do OREDA (2002)

Subsistema	Curva de Probabilidade de falha
Controle e Monitoramento	<p> <span style="display: inline-block; width: 1em; border-bottom: 1px dashed black; margin-right: 0.5em;"></span> Falha Crítica  <span style="display: inline-block; width: 1em; border-bottom: 1px dash-dot black; margin-right: 0.5em;"></span> Falha Degradada  <span style="display: inline-block; width: 1em; border-bottom: 1px solid black; margin-right: 0.5em;"></span> Falha Total         </p>
Indefinido	<p> <span style="display: inline-block; width: 1em; border-bottom: 1px dashed black; margin-right: 0.5em;"></span> Falha Crítica  <span style="display: inline-block; width: 1em; border-bottom: 1px dash-dot black; margin-right: 0.5em;"></span> Falha Degradada  <span style="display: inline-block; width: 1em; border-bottom: 1px solid black; margin-right: 0.5em;"></span> Falha Total         </p>

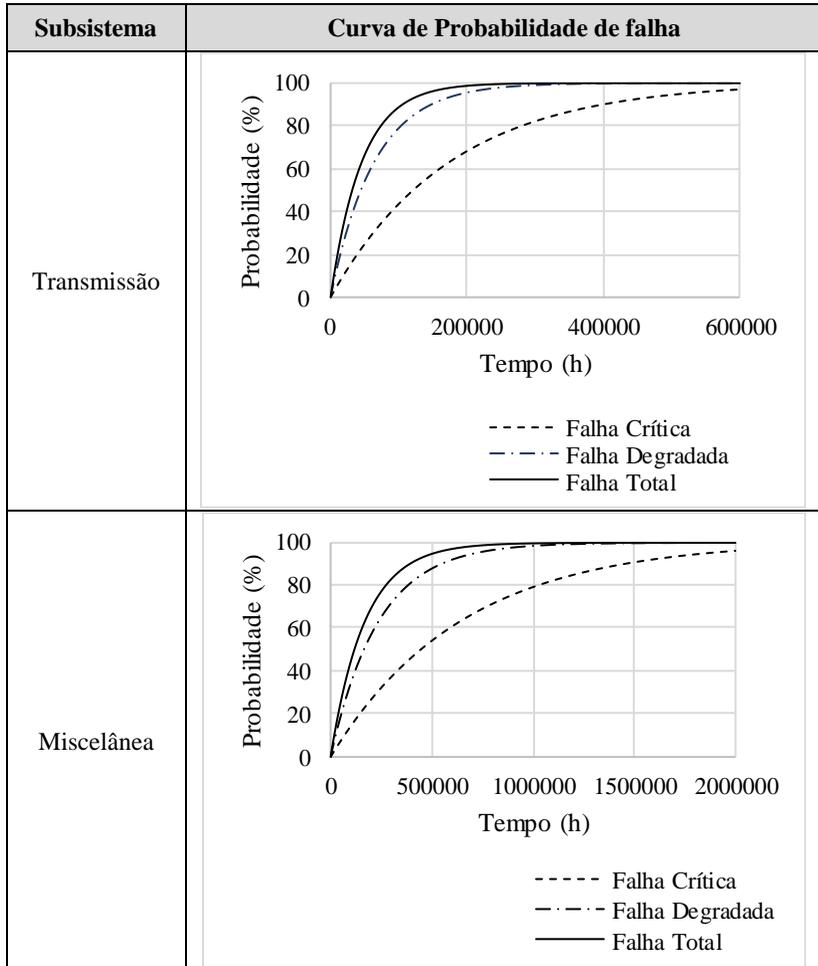
Fonte: O autor.

Quadro 5.6 - Curvas de Probabilidade de Falha para cada Subsistema com os dados obtidos nos relatórios do OREDA (2002) (continuação)

Subsistema	Curva de Probabilidade de falha
Bomba	 <p data-bbox="344 284 889 703">           Probabilidade (%)         </p> <p data-bbox="344 526 889 590">Tempo (h)</p> <p data-bbox="647 628 889 703">           - - - - Falha Crítica            - · - · Falha Degradada            — Falha Total         </p>
Lubrificação	 <p data-bbox="344 743 889 967">Probabilidade (%)</p> <p data-bbox="344 983 889 1046">Tempo (h)</p> <p data-bbox="647 1069 889 1163">           - - - - Falha Crítica            - · - · Falha Degradada            — Falha Total         </p>

Fonte: O autor.

Quadro 5.6 - Curvas de Probabilidade de Falha para cada Substema com os dados obtidos nos relatórios do OREDA (2002) (continuação)

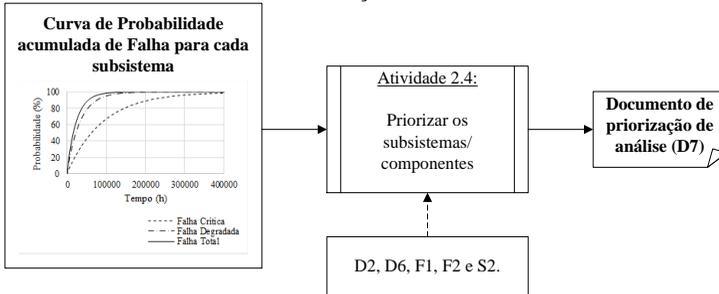


Fonte: O autor.

#### 5.2.2.4 Atividade 2.4: Priorizar os sistemas para análise

A partir das atividades anteriores pode-se seguir com a Atividade 2.4. A Figura 5.11 apresenta a entrada (curvas de probabilidade de acumulada de falha) a e saída (Documento de Priorização de Análise D7) para esta atividade.

Figura 5.11 - Atividade 2.4: priorização dos subsistemas do SB a partir das curvas de probabilidade de falha e das informações obtidas das atividades anteriores



Fonte: O autor.

De acordo com as atividades anteriores, percebe-se que as taxas de falhas (Tabela 5.2) e as probabilidades acumuladas de falhas por degradação (Quadro 5.6) são mais significativas para cada subsistema.

Como o interesse está nos subsistemas hidráulicos, então o subsistema bomba e o subsistema de lubrificação serão os tratados a partir próxima etapa. Apesar destes subsistemas não apresentarem as maiores probabilidades acumuladas de falha por degradação, esses subsistemas representam o total de 28 % das falhas encontradas no sistema (ver Figura 5.9).

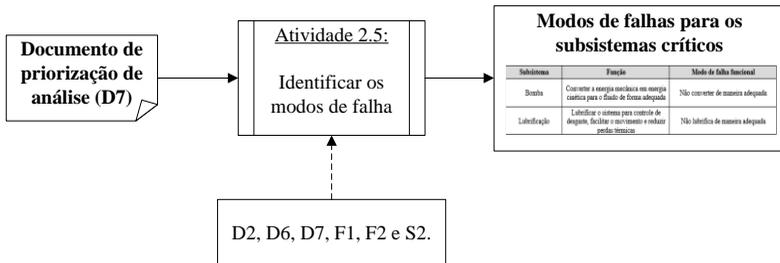
Todas as informações geradas na Etapa 2 até o momento devem ser organizadas conforme o Documento de Priorização de Análise, que pode ser visto no Apêndice A.2. Neste documento deve apresentar as justificativas na escolha dos subsistemas assumidos como críticos. Isso é importante pois deixa claro os critérios estabelecidos nesta priorização.

#### 5.2.2.5 Atividade 2.5: Identificar os modos de falhas

Com as informações geradas nas atividades anteriores sumarizadas no documento D7, pode-se, então, identificar os modos de falhas para os subsistemas mais críticos. A Figura 5.12 mostra a entrada (Documento D7) e saída (modos de falhas para os subsistemas críticos) para a Atividade 2.5.

Como os modos de falhas apresentados nos relatórios do OREDA (2002) não são definidos de forma clara, uma vez que o modo de falha acaba se confundindo entre causa ou efeito da falha, optou-se por linguagem um pouco diferente. Isto implica que as informações organizadas aqui no texto são frutos da interpretação do autor, a partir da leitura feita nos documentos analisados.

Figura 5.12 - Atividade 2.5: identificação dos modos de falhas para subsistemas críticos



Fonte: O autor.

Neste contexto, o modo de falha dos subsistemas, pelo princípio da análise funcional, será estabelecido como a negação da função de cada um. Vale ressaltar, que com essa adoção ou este princípio analítico acaba se condensando todos os modos de falhas propostos no OREDA. O Quadro 5.7 mostra o modo de falha funcional para cada um dos subsistemas em análise.

Quadro 5.7 - Modo de falha para o Subsistema Bomba e de Lubrificação

Subsistema	Função	Modo de falha funcional
Bomba	Converter a energia mecânica em energia cinética para o fluido de forma adequada	Não converter de maneira adequada
Lubrificação	Lubrificar o sistema para controle de desgaste, facilitar o movimento e reduzir perdas térmicas	Não lubrifica de maneira adequada

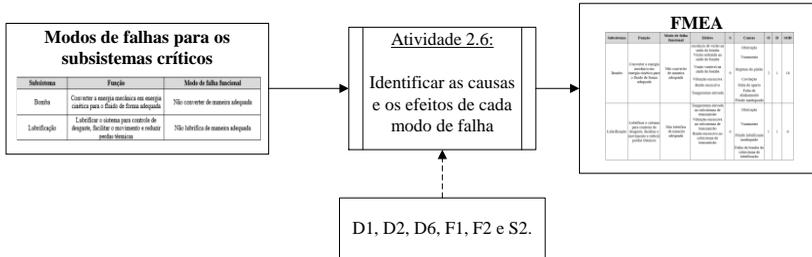
Fonte: O autor.

### 5.2.2.6 Atividade 2.6: Identificar as causas e efeitos de cada modo de falha

Com base na saída da Atividade 2.5, e nas informações coletadas na aplicação da sistemática, pode-se identificar as causas e efeitos dos

modos de falhas identificados. A Figura 5.13 elucida as entrada e saída para a Atividade 2.6. A saída desta atividade constitui de um FMEA desenvolvido.

Figura 5.13 - Atividade 2.6: identificação das causas e efeitos para o modo de falha funcional identificado para cada subsistema crítico



Fonte: O autor.

Esta atividade consiste na aplicação de uma técnica de análise para identificar o relacionamento de cada item com a função, o modo de falha, efeito da falha e causa da falha. Neste caso, recomenda-se a aplicação do FMEA, uma vez que esta técnica auxilia na estruturação desse relacionamento e orienta as ações a serem tomadas em relação as causas e efeitos dos modos de falhas.

Como exposto anteriormente, o FMEA pode ter um viés para o projetista (*Design FMEA*) ou para mantenedor (*Service FMEA*). Para a presente aplicação o FMEA desenvolvido possui um caráter voltado para ações de manutenção e será utilizado para auxiliar na identificação das recomendações feitas na etapa posterior.

Assim, a partir dos modos de falhas pode-se identificar os efeitos e causas de para cada um dos modos de falhas e, então, pode-se montar um FMEA para os subsistemas. O Quadro 5.8 mostra o FMEA para os subsistemas em análise.

Para se determinar a severidade, ocorrência e a detecção foi utilizado a norma SAE – J1739. Foi atribuído um valor de 9 para severidade do subsistema bomba, já que o seu modo de falha pode levar a um grave risco humano e ambiental, todavia já existe uma barreira para tal efeito (sistema de monitoramento e controle). A detecção foi atribuída o valor de 1 para ambos os subsistemas, pois o sistema de bombeamento possui um subsistema de controle e monitoramento para averiguação dos mesmos, logo as percepções destes modos de falha acabam se tornando quase que certa.

Quadro 5.8 - FMEA para os subsistemas bomba e de lubrificação

Subsistema	Função	Modo de falha funcional	Efeitos	S	Causas	O	D	SOD (NPR)
Bomba	Converter a energia mecânica em energia cinética para o fluido de forma adequada	Não converter de maneira adequada	Ausência de vazão na saída da bomba Vazão reduzida na saída da bomba Vazão variável na saída da bomba Vibração excessiva Ruído excessivo Temperatura elevada	9	Obstrução Vazamento Ruptura do pistão Cavitação Falta de aperto Falta de alinhamento Fluido inadequado	2	1	921 (18)
Lubrificação	Lubrificar o sistema para controle de desgaste, facilitar o movimento e reduzir perdas térmicas	Não lubrifica de maneira adequada	Temperatura elevada no subsistema de transmissão Vibração excessiva no subsistema de transmissão Ruído excessivo no subsistema de transmissão	6	Obstrução Vazamento Fluido lubrificante inadequado Falha da bomba do subsistema de lubrificação	1	1	611 (6)

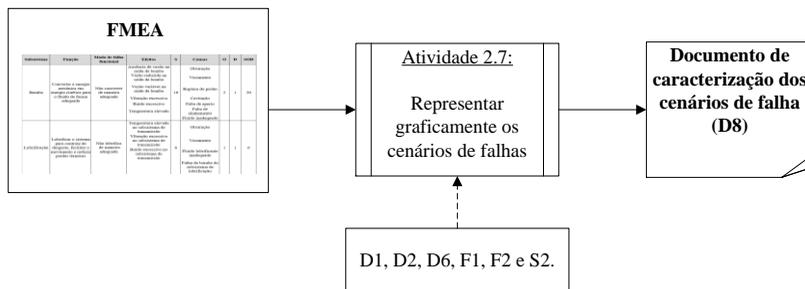
Fonte: O autor.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> As informações utilizadas para a elaboração do FMEA foram compiladas de diversas referências utilizadas nessa presente dissertação, tais como: Asaff

### 5.2.2.7 Atividade 2.7: Representar os cenários de falhas

A Figura 5.14 apresenta a entrada e a saída para a Atividade 2.7. A entrada consiste no FMEA desenvolvido e saída constitui do Documento de Caracterização dos Cenários de Falha (D8) que sumariza as informações coletadas a partir da Atividade 2.5 até a esta atividade.

Figura 5.14 - Atividade 2.7: representação dos cenários de falhas para os subsistemas críticos



Fonte: O autor.

Quando no FMEA se identificam modos de falha significativos, cujos efeitos são portadores de severidade que podem comprometer a saúde humana ou ambiental é recomendável desenvolver uma análise por árvore de falha (FTA) para estabelecer alguns cenários de como as causas transitam pelos modos de falha e produzem os efeitos com nível de severidade elevada.

A partir da análise dos modos de falhas encontrados no FMEA foi possível construir um FTA para cada falha. A

Figura 5.15 e a Figura 5.16 mostram as FTA desenvolvidas a partir do FMEA.

Na

Figura 5.15, observe que a falha no Sistema de Lubrificação tem várias causas possíveis extraídas do FMEA (Quadro 5.8). Por exemplo, o vazamento pode ocorrer devido a quatro causas intermediárias, como: corrosão, desgaste das vedações, pressão excessiva e abrasão. Perceba que a abrasão acontece devido a contaminação do fluido que, por sua vez, pode acontecer pela ruptura dos elementos filtrante e assim por diante.

Na Figura 5.16, por exemplo, a falha de bomba ocorre pela falta de alinhamento que acontece por três causas: erro de projeto, erro de

---

(2013); Dias (2012); Kagueima (2012); Vinadé (2003); Totten, Will e Feldman (2001), entre outros.

manutenção ou desgaste do componente. O erro de manutenção pode ter sido ocasionado pela falta de capacitação da equipe, falta de ferramentas adequadas ou procedimentos inadequados. O erro de projeto, por sua vez, pode ter sido originado por um equívoco no detalhamento dos processos para a montagem da bomba. Já o desgaste do componente ter surgido do uso, de condições ambientais e operacionais, entre outros.

Perceba que as portas lógicas utilizadas foram todas do tipo “ou” pelo fato de não existir dependência entre estas causas. Note ainda que nos dois FTA (

Figura 5.15 e Figura 5.16) aparecem erros de projeto e erros de manutenção, que são as causas onde as ações propostas na SisAD busca pretende atuar.

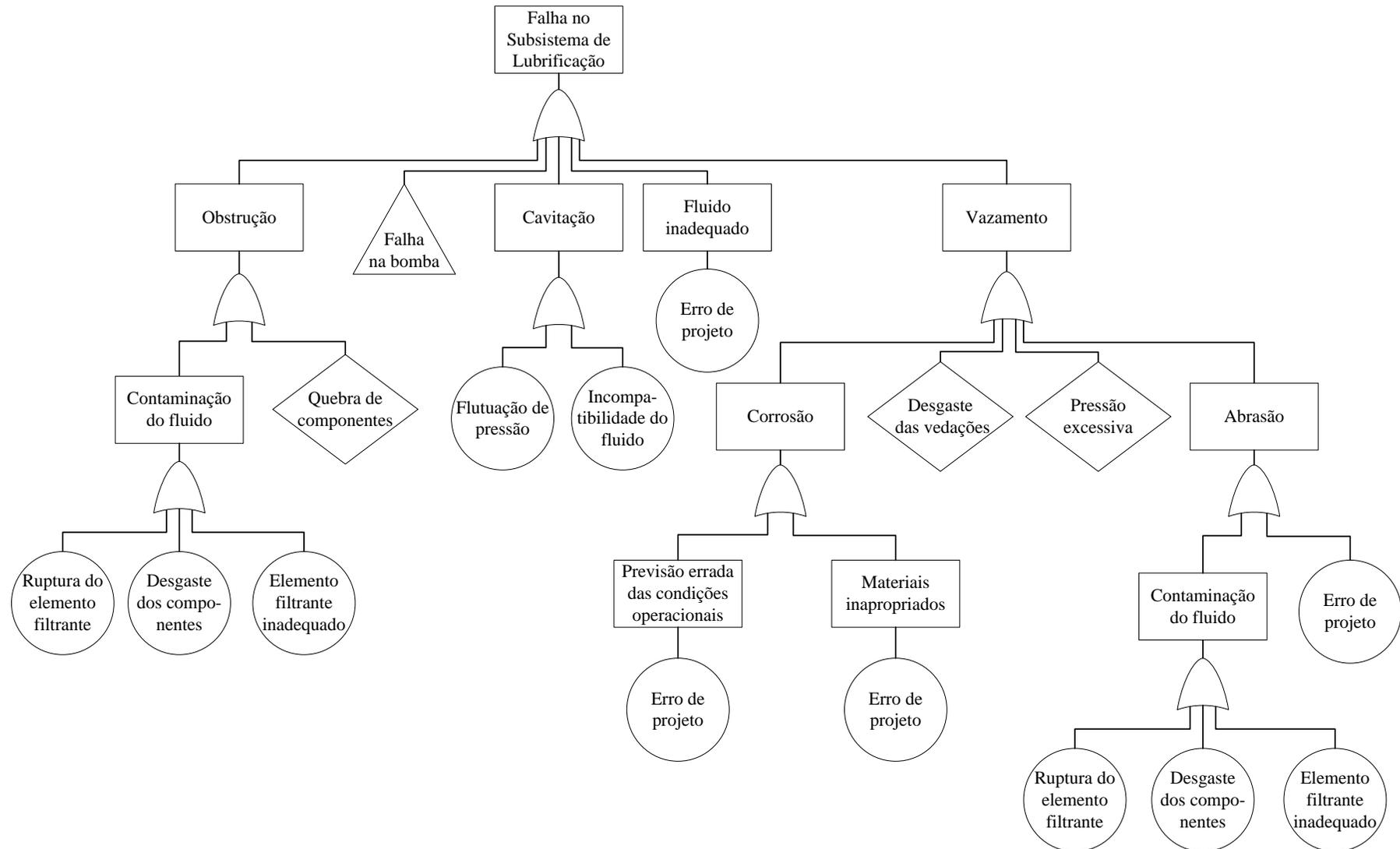
Ao final da Atividade 2.7, encerra-se a Etapa 2 e, como já expostos, as informações coletadas são utilizadas para elaborar o Documento de Caracterização dos Cenários de Falhas (D8) conforme o *template* deste documento apresentado no Apêndice A.3.

Assim, como no Documento de Priorização de Análise (D7) deve ser apresentado a justificativa do uso das técnicas e ferramentas utilizadas nesta atividade para ter claro o objetivo da técnica empregada. Por exemplo, uma justificativa para o uso da FTA permite explicitar a relação de causa e efeito como é proposto nessa atividade, além de ser capaz de quantificar os cenários elaborados desde que se possua as probabilidades de cada evento.

Com o documento D8 elaborado pode-se dar continuidade a análise e este documento é utilizado como entrada para a última etapa (Etapa 3).



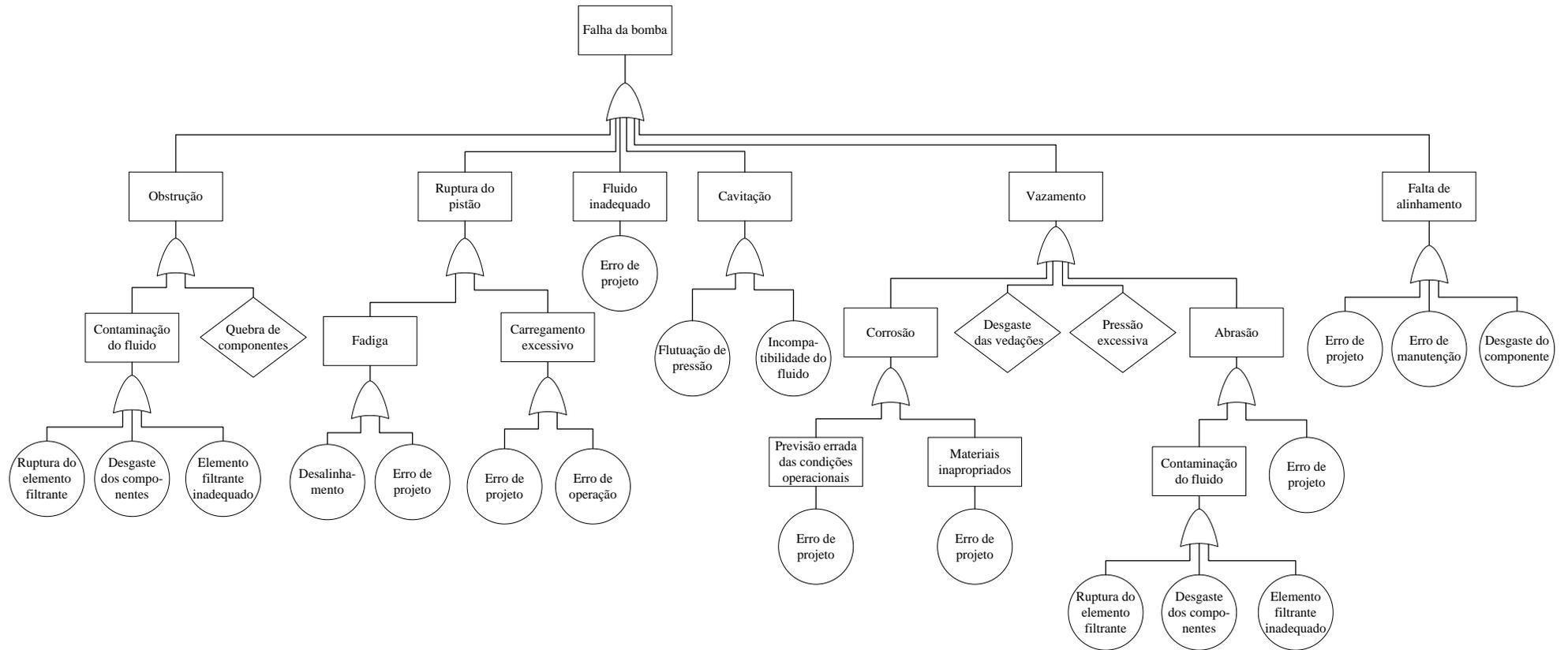
Figura 5.15 - FTA para o Subsistema de Lubrificação



Fonte: O autor<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Assim como no FMEA, as informações utilizadas para a elaboração do FTA foram compiladas de diversas referências utilizadas nessa presente dissertação, tais como: Asaff (2013); Dias (2012); Kagueima (2012); Vinadé (2003); Totten, Will e Feldman (2001), entre outros.

Figura 5.16 - FTA para o Subsistema Bomba



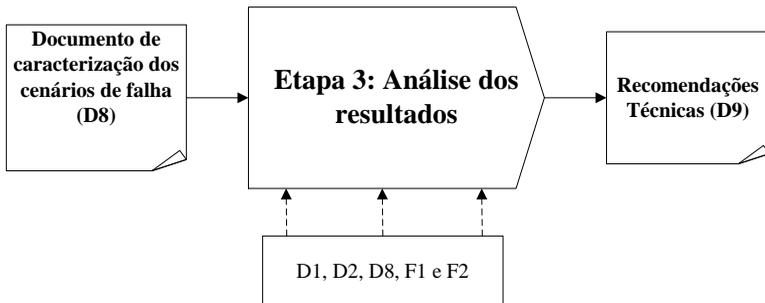
Fonte: O autor.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Ver nota anterior (nota 5).

### 5.2.3 ETAPA 3: ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir do conhecimento gerado nas etapas anteriores, pode-se então dar prosseguimento com a SisAD. A Figura 5.17 apresenta a Etapa 3, que tem como entrada o documento D8 e apresenta como saída as ações identificadas para solucionar ou mitigar os problemas causados pelos processos de degradação.

Figura 5.17 - Etapa 3: análise dos resultados obtidos pela SisAD para solucionar ou mitigar os problemas causados pelos processos de degradação

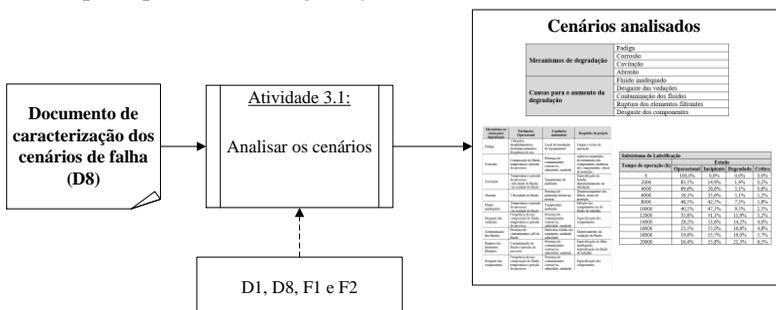


Fonte: O autor.

#### 5.2.3.1 Atividade 3.1: Analisar os cenários

O objetivo desta etapa consiste na avaliação das informações e conhecimentos gerados na Etapa 2 para se identificar os problemas advindos dos processos de degradação. A Figura 5.18 mostra as entradas e saídas para esta atividade.

Figura 5.18 - Atividade 3.1: análise dos cenários para identificação dos problemas causados pelos processos de degradação



Fonte: O autor.

A partir da análise do FTA (

Figura 5.15 e Figura 5.16) percebe-se que existem várias causas que levam ao aumento da degradação ou são um mecanismo de degradação. O Quadro 5.9 mostra exemplos de causas e mecanismos de degradação.

Quadro 5.9 - Exemplos de mecanismos e causas de degradação nos subsistemas Bomba e de Lubrificação

<b>Mecanismos de degradação</b>	Fadiga
	Corrosão
	Cavitação
	Abrasão
<b>Causas para o aumento da degradação</b>	Fluido inadequado
	Desgaste das vedações
	Contaminação dos fluidos
	Ruptura dos elementos filtrantes
	Desgaste dos componentes

Fonte: O autor.

Como discutido no Capítulo 3, estes processos e causas estão relacionados com parâmetros operacionais, condições ambientais e requisitos de projeto do sistema técnico. Exemplos destes parâmetros podem ser observados no Quadro 5.10.

Quadro 5.10 - Mecanismos e causas de degradação e parâmetros do sistema

<b>Mecanismo ou causa para degradação</b>	<b>Parâmetro Operacional</b>	<b>Condições ambientais</b>	<b>Requisito de projeto</b>
Fadiga	Vibrações, desalinhamentos, desbalanceamentos, frequência de uso.	Local de instalação do equipamento	Cargas e ciclos de operação.
Contaminação dos fluidos	Presença de contaminantes, pH do fluido	Partículas sólidas em suspensão, umidade, salinidade	Monitoramento da condição do fluido.
Cavitação	Temperatura e pressão do processo, velocidade do fluido, viscosidade do fluido	Temperatura do ambiente.	Especificação da bomba, dimensionamento da tubulação.

Fonte: O autor.

Quadro 5.10 - Mecanismos e causas de degradação e parâmetros do sistema (continuação).

<b>Mecanismo ou causa para degradação</b>	<b>Parâmetro Operacional</b>	<b>Condições ambientais</b>	<b>Requisito de projeto</b>
Abrasão	Velocidade do fluido	Presença de partículas abrasivas, poeiras.	Dimensionamento dos filtros, classe de proteção.
Fluido inadequado	Temperatura e pressão do processo, viscosidade do fluido	Temperatura ambiente.	Seleção dos componentes ou do fluido de trabalho.
Desgaste das vedações	Frequência de uso, composição do fluido, temperatura e pressão do processo	Presença de contaminantes corrosivos, salinidade, umidade	Especificação dos componentes.
Corrosão	Composição do fluido, temperatura e pressão do processo.	Presença de contaminantes corrosivos, salinidade, umidade.	Aditivos requeridos, revestimentos dos componentes, materiais dos componentes, classe de proteção.
Ruptura dos elementos filtrantes	Contaminação do fluido e pressão do processo	Presença de contaminantes corrosivos, salinidade, umidade.	Especificação do filtro inadequado, especificação do fluido de trabalho.
Desgaste dos componentes	Frequência de uso, composição do fluido, temperatura e pressão do processo	Presença de contaminantes corrosivos, salinidade, umidade.	Especificação dos componentes

Fonte: O autor.

Além destes cenários, para melhor quantificar as informações de falhas do SB, decidiu-se utilizar uma abordagem de multiestados. A abordagem multiestado é de grande importância para o processo de falhas por degradação, uma vez que é capaz de elucidar os estados intermediários entre os estados operacional e de falha.

No Apêndice D consta toda a modelagem matemática desenvolvida para todos os subsistemas. No entanto, para esta atividade, dá-se o foco aos subsistemas Bomba e de Lubrificação.

Nesta modelagem assumiu-se que os subsistemas possuem quatro estados: operacional, indicativo, degradado e crítico. Abaixo segue o significado de cada um deles:

- **Estado operacional:** constitui o estado de inicial e representa o total funcionamento do sistema;
- **Estado indicativo:** evento no qual o sistema começa a produzir efeitos perceptíveis que podem levar ao sistema a um estado degradado ou crítico;
- **Estado degradado:** estado de falha no qual o sistema não deixa de cumprir a função global, mas já existe uma perda de desempenho do sistema;
- **Estado crítico:** estado de falha no qual o sistema deixa de cumprir a função global do sistema.

A modelagem é desenvolvida para se estimar a probabilidade dos subsistemas se encontrarem em cada desses estados em função do tempo de operação. Isso é importante para organizar as ações de manutenção de levantar cada um dos itens dos respectivos estados de falha, restabelecendo para a o estado operacional.

A Tabela 5.3 mostra a probabilidade de cada um dos estados para o Subsistema Bomba e a Tabela 5.4 para o Subsistema de Lubrificação.

Tabela 5.3 - Probabilidade dos estados para o Subsistema Bomba

<b>Subsistema Bomba</b>				
<b>Tempo de operação (h)</b>	<b>Estado</b>			
	<b>Operacional</b>	<b>Indicativo</b>	<b>Degradado</b>	<b>Crítico</b>
0	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2000	80,8%	17,4%	1,6%	0,3%
4000	65,2%	30,4%	3,6%	0,8%
6000	52,7%	39,9%	6,0%	1,4%
8000	42,6%	46,7%	8,5%	2,2%
10000	34,4%	51,4%	11,2%	3,1%
12000	27,8%	54,3%	14,0%	4,0%
14000	22,4%	55,9%	16,7%	4,9%
16000	18,1%	56,5%	19,5%	5,9%
18000	14,6%	56,3%	22,1%	6,9%
20000	11,8%	55,6%	24,7%	7,9%

Fonte: O autor.

Tabela 5.4 - Probabilidade dos estados para o Subsistema de Lubrificação

<b>Subsistema de Lubrificação</b>				
<b>Tempo de operação (h)</b>	<b>Estado</b>			
	<b>Operacional</b>	<b>Indicativo</b>	<b>Degradado</b>	<b>Crítico</b>
0	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2000	83,5%	14,9%	1,4%	0,2%
4000	69,6%	26,6%	3,1%	0,6%
6000	58,1%	35,6%	5,1%	1,2%
8000	48,5%	42,5%	7,3%	1,8%
10000	40,5%	47,5%	9,5%	2,5%
12000	33,8%	51,1%	11,9%	3,2%
14000	28,2%	53,6%	14,2%	4,0%
16000	23,5%	55,0%	16,6%	4,8%
18000	19,6%	55,7%	19,0%	5,7%
20000	16,4%	55,8%	21,3%	6,5%

Fonte: O autor.

Note que estes subsistemas são robustos, já que a probabilidade de ocorrência de um estado crítico é baixa, mesmo após um longo período de operação.

Outra percepção que se pode ser vista é que o estado indicativo mostra onde existe a maior probabilidade de detecção da falha através dos efeitos. Assim, o tempo onde há a maior probabilidade pode ser servir para uma ação de inspeção no sistema técnico. Fazendo um paralelo com a Figura 1.6 e a Figura 3.3, o estado indicativo estaria localizado na região normal, contudo bem próximo a região de emergência.

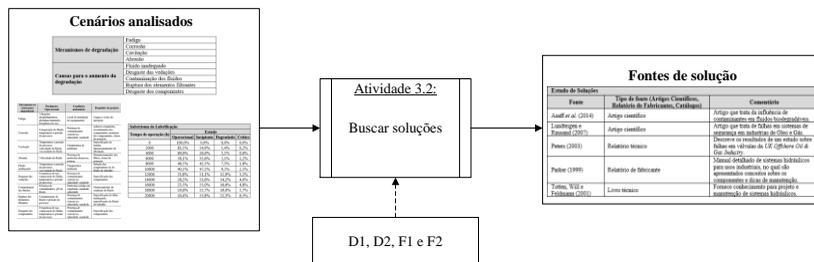
### 5.2.3.2 Atividade 3.2: Buscar soluções

A partir da análise dos cenários pode-se então buscar soluções para os problemas encontrados e discutidos. A Figura 5.19 mostra as entradas e saídas da Atividade 3.2.

Conforme discutido no Capítulo 4, esta atividade visa buscar soluções em artigos científicos (D1), catálogos e manuais de fabricantes (D2), consulta a especialistas do sistema técnico ou outros que tiveram experiências similares para os processos de degradação observados e

caracterizados nas etapas e atividades anteriores. O Quadro 5.11 exemplifica este levantamento de informações. Este quadro está em concordância com o *template* apresentado no Documento Recomendações Técnicas (D9) no Apêndice A.4.

Figura 5.19 - Atividade 3.2: busca de soluções para os cenários analisados na Atividade 3.1



Fonte: O autor.

Quadro 5.11 - Exemplo de recomendação de fontes para consulta de soluções

Estudo de Soluções		
Fonte	Tipo de fonte (Artigos Científicos, Relatório de Fabricantes, Catálogos)	Comentário
Asaff <i>et al.</i> (2014)	Artigo científico	Artigo que trata da influência de contaminantes em fluidos biodegradáveis.
Lundteigen e Rausand (2007)	Artigo científico	Artigo que trata de falhas em sistemas de segurança em indústrias de Óleo e Gás.
Peters (2003)	Relatório técnico	Descreve os resultados de um estudo sobre falhas em válvulas da <i>UK Offshore Oil &amp; Gas Industry</i> .
Parker (1999)	Relatório de fabricante	Manual detalhado de sistemas hidráulicos para usos industriais, no qual são apresentados conceitos sobre os componentes e dicas de manutenção.
Totten, Will e Feldmann (2001)	Livro técnico	Fornecer conhecimento para projeto e manutenção de sistemas hidráulicos.

Fonte: O autor.

### 5.2.3.3 Atividade 3.3: Recomendações para manutenção

Com as fontes encontradas na atividade anterior, pode-se então propor as recomendações técnicas para os problemas encontrados para os processos de degradação no sistema técnico. A Figura 5.20 apresenta as entradas e saídas desta atividade.

Figura 5.20 - Atividade 3.3: recomendações para a manutenção baseada nas fontes elencadas na Atividade 3.2



Fonte: O autor.

O Quadro 5.12 ilustra recomendações técnicas de acordo estabelecido para presente atividade. Este quadro segue o padrão estabelecido no Documento Recomendações Técnicas (D9) no Apêndice A.4.

As recomendações presentes no Quadro 5.12 estão em conformidade com as soluções encontradas na atividade anterior. Como os subsistemas apresentam causas e modos de falhas semelhantes, não foi subdividido para subsistema.

Note ainda que as recomendações técnicas: verificar a rotação da bomba; verificar a viscosidade do fluido e verificar possíveis obstruções (Quadro 5.12) podem ser feitas utilizando o tempo onde a probabilidade do estado indicativo é maior (16.000 h, no caso do subsistema bomba) presente nas Tabela 5.3 e Tabela 5.4.

Dessa maneira encerra-se o ciclo proposto para SisAD, note que as informações colhidas sobre os processos de degradação podem ser alimentadas no software SisAD como uma forma de manter o conhecimento gerado e utilizar para futuras aplicações.

Quadro 5.12 - Exemplo de recomendações para manutenção

Registro das Recomendações Técnicas			
Modo de falha/ causa da degradação	Recomendação Técnica	Justificativas	Objetivos
Cavitação	Verificar a rotação da bomba; Verificar a viscosidade do fluido; Evitar restrições (curvas e reduções) na tubulação de sucção da bomba.	A excessiva rotação da bomba, obstruções e a alta viscosidade do fluido aumentam a probabilidade de ocorrência da cavitação.	Reduzir a probabilidade de ocorrência da cavitação.
Contaminação dos fluidos	Verificar o elemento filtrante; Fazer inspeções visuais; Rever procedimentos de manutenção.	O uso de elementos filtrantes impróprios, danificados ou saturados levam ao aumento da contaminação do fluido. Outra causa do aumento da contaminação deve-se a procedimentos de manutenção inadequados ou a presença de rasgos nas tubulações.	Controlar e monitorar ao nível de contaminação do fluido.
Corrosão	Fazer análise dos óleos lubrificantes; Rever procedimentos de manutenção; Verificar condições operacionais e ambientais.	A verificação das condições operacionais e ambientais ajuda na identificação de prováveis substâncias corrosivas. A análise de óleo ajuda a verificar a condição do óleo lubrificante. Alinhado a isto, uma revisão dos procedimentos de manutenção também deve ser necessário.	Reduzir e controlar o processo de corrosão do sistema.
Desgaste dos componentes	Fazer inspeções visuais; Fazer análise de óleo lubrificante; Melhorar sistema de monitoramento; Rever procedimentos de manutenção.	Inspeções visuais e uma revisão do sistema de monitoramento pode ajudar na verificação da condição de operação. A análise de óleo pode identificar a presença de contaminantes no fluido. Alinhado a isso, uma revisão dos procedimentos de manutenção pode corroborar com essas medidas.	Reduzir o desgaste dos componentes.

Fonte: O autor.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Para elaboração das recomendações técnicas foram compilados conhecimentos de diversas referências utilizadas nessa presente dissertação,

### 5.3 Avaliação da SisAD

Com o intuito de avaliar se a SisAD e o *software* proposto atenderam os objetivos para qual foram desenvolvidos, foi realizada uma avaliação com um grupo de profissionais. Este grupo foi composto por 15 (quinze) avaliadores.

O grupo de avaliadores é constituído de acadêmicos em nível de Mestrado e Doutorado do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Uma parte desse grupo pertence ao laboratório NeDIP (Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produto) e possuem conhecimento em estruturação de modelos, sistemáticas e metodologias. E a outra parte pertence ao laboratório Laship (Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos) e é familiarizada com o projeto e trabalho com Sistemas Hidráulicos.

Para o processo de avaliação foi apresentado a SisAD, a aplicação desenvolvida e o *software* proposto. Após a apresentação foi aplicado um questionário (Apêndice E) que buscou avaliar critérios sobre a clareza da sistemática e do *software*, em termos do objetivo, estrutura e detalhamento e utilidade. A elaboração deste questionário foi utilizada como referência outros questionários como os usados por Fuentes (2006) e Reinert (2013).

Avaliação aconteceu de forma presencial e, portanto, se pode discutir acerca SisAD e do *software* proposto. A Tabela 5.5 apresenta o resultado da avaliação realizada.

Tabela 5.5 - Resultado da avaliação

<b>Crítérios</b>	<b>Totalmente</b>	<b>Parcialmente</b>	<b>Não</b>
Clareza do objetivo da sistemática proposta	13/15	2/15	-
Clareza e entendimento da estrutura da sistemática	8/15	7/15	-
Nível de detalhamento requerido para aplicação	14/15	1/15	-
Facilidade na orientação da análise do processo de degradação	14/15	1/15	-

Fonte: O autor.

---

tais como: Asaff (2013); Dias (2012); Parker (1999); Totten, Will e Feldman (2001), entre outros.

Tabela 5.5 - Resultado da avaliação (continuação)

<b>Crítérios</b>	<b>Totalmente</b>	<b>Parcialmente</b>	<b>Não</b>
Coerência entre o <i>software</i> proposto e a sistemática proposta	9/15	6/15	-
Aplicabilidade do <i>software</i> na sistemática proposta	10/15	5/15	-

Fonte: O autor.

Com os resultados, pode-se afirmar, que a sistemática cumpriu com o objetivo proposto, ou seja, que a SisAD pode ser utilizada na análise dos processos de degradação dos sistemas técnicos. Além disso, a SisAD pode atuar de forma a facilitar o entendimento dos processos de degradação e possui um nível adequado de detalhamento para aplicação.

Apesar da proposição estar clara, o entendimento e a clareza da estrutura proposta não obtiveram uma boa receptividade por parte dos participantes. Muitas dessas críticas deram-se pela forma de apresentação da sistemática, que somente após a discussões realizadas ao final da apresentação, a estrutura proposta veio a ficar clara para os avaliadores.

Tanto a coerência, quanto à aplicabilidade do *software* proposto em relação à SisAD, não obteve um resultado completamente favorável. As principais críticas deram-se que o *software* não é um passo a passo da aplicação da sistemática e não era percebido na aplicação da sistemática. Isso pode-se ter advindo, também, da forma na qual foi apresentado a sistemática ao grupo de avaliadores, bem como na própria clareza da pergunta realizada. Assim como na estrutura, o propósito somente ficou claro após aos debates realizado após à apresentação.

Todavia, pode-se afirmar que a tanto a sistemática proposta quanto o *software* desenvolvido foram bem aceitos. E que todas os questionamentos levantados durante a avaliação devem ser considerados para um processo de aperfeiçoamento e expansão.

#### **5.4 Considerações finais**

Este capítulo apresentou uma aplicação da SisAD em um problema teórico cujo objetivo era facilitar o processo de entendimento da funcionalidade e do objetivo da sistemática proposta. Somado a isso, neste capítulo também foi explicitado o processo de avaliação realizado cujo o objetivo era estimar de maneira qualitativa a clareza da estrutura, do detalhamento e utilidade da SisAD.

Durante a aplicação da SisAD, foi realizado uma discussão de cada uma das etapas, apresentando-se as atividades que a compõem, bem como os *templates* dos documentos (D), as ferramentas (F) necessário à realização das atividades. Dessa maneira, pôde-se capturar as informações mais relevantes do sistema técnico e ajudar no entendimento do processo de degradação do sistema estudado.

Outro ponto a ser ressaltado, é que para este caso tinha-se os dados de taxas de falhas. No entanto, na inexistência desses dados a SisAD pode nortear na coleta desses dados com: a definição de tipo de falha (crítica e degradada, por exemplo); utilização do FMEA no auxílio da separação dos dados de falhas por causas e seu posterior enquadramento em um dos tipos de falhas. Dessa maneira, esse emprego mais qualitativo da SisAD subsidia uma futura aplicação com um teor mais quantitativo.

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões referentes a aplicação da sistemática e sugestões para trabalhos futuros.



## 6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Introdução

Como visto, um sistema técnico degrada-se com o passar do tempo o que pode levá-lo a uma falha completa. Fundamentalmente, este processo de degradação é gradual e produz efeitos, como: aumento de vibração, temperatura, ruído, nucleação e propagação de trincas e entre outros.

O conhecimento e a caracterização de tais processos de degradação são essenciais no processo de proposição de ações, tanto para questões operacionais e de manutenção quanto para questões de projeto do sistema.

No entanto, surgem questionamentos e desafios relacionados com a caracterização do processo de degradação do sistema técnico, como:

- Que tipo de informação deve ser extraída do sistema?
- Quais são os mecanismos de degradação que estão presentes no sistema técnico?
- Quais são os melhores parâmetros para descrever estado atual no que diz respeito a estes mecanismos de degradação?
- Tem-se conhecimento suficiente sobre como os processos de degradação afetam o sistema técnico?
- Existem dados relevantes para caracterizar e modelar estes processos?
- Existem ferramentas e dados suficientes para descrever o efeito destes processos?
- Como garantir que existe conhecimento suficiente para realizar a caracterização do processo de degradação?
- Como organizar as informações extraídas?

Nesta perspectiva, o presente trabalho propôs uma sistemática para organizar, caracterizar e analisar os processos de degradação presente nos sistemas técnicos. Para atingir tal objetivo, esta dissertação buscou estruturar um conhecimento para solucionar estes questionamentos e desafios.

Estes questionamentos motivaram o autor a trabalhar para contribuir com a metodologia de projeto (PRODIP), no que tange à macrofase de projeção e o uso. Entende-se que a sistemática desenvolvida auxilia na projeção provendo informações pertinentes aos

processos de degradação e o *software* SisAD como um facilitador na busca e armazenamento do conhecimento dos processos de degradação.

Já no uso, entende-se que a SisAD contribui nos métodos de análise de falhas, fornecendo uma maneira de analisar qualitativamente e quantitativamente os dados de degradação e de falhas para tomadas de decisão na gestão de manutenção.

De modo geral, o Capítulo 1 trouxe o contexto geral do trabalho, evidenciando os motivos da proposição da presente dissertação. O Capítulo 2 discutiu sobre as falhas de modo mais abrangente, bem como técnicas de análise das mesmas. O Capítulo 3 elucidou o processo de degradação de sistemas técnicos trazendo conceitos e trabalhos relacionados ao tema, servindo de base para elaboração da sistemática proposta. Em seguida, nos Capítulos 4 e 5 foi apresentado a SisAD e um exemplo teórico de aplicação para melhor apresentação e elucidação dos conhecimentos estruturados na sistemática proposta, além de uma avaliação da sistemática proposta.

## **6.2 Resultado e contribuições**

### **6.2.1 QUANTO À SISTEMÁTICA DESENVOLVIDA E AO SOFTWARE PROPOSTO**

O desenvolvimento dessa dissertação trouxe como resultado uma sistemática (SisAD) para análise do processo de degradação de sistemas técnicos tendo como alicerce diferentes técnicas (Análise Funcional, FMEA, FTA, CNEA e Cadeias de Markov) que são utilizadas para o levantamento de informações. A SisAD contribui, ainda, na geração do conhecimento para tratar os processos de degradação dos sistemas técnicos.

Na primeira etapa da SisAD, busca-se elucidar o nível de conhecimento da funcionalidade do sistema técnico, identificando suas funções e como estas estão se correlacionando. Isto facilita o entendimento dos efeitos e causas das falhas de cada um dos itens do sistema técnico. A primeira etapa também serve de suporte para a coleta de informações a serem extraídas no sistema.

A segunda etapa, Caracterização dos Cenários de Falhas, ajuda na estruturação das informações mais relevantes do processo de degradação dos sistemas técnicos. Isso contribui com o tipo de informação (modos de falha, efeitos e causas das falhas) que deve ser extraído. Somado a isso, inicia-se o processo de identificação dos processos de degradação presentes no sistema técnico.

Ainda na segunda etapa, além de uma análise qualitativa dos processos de degradação, é possível, a partir da análise dos dados do sistema, quantificar tais informações obtidas desde que as mesmas estejam organizadas de forma a possibilitar a transformação em taxas de falhas e/ou taxa de recolocação. Ou seja, mesmo que o sistema ainda não possua tais dados, essa estruturação é capaz de nortear que tipo de dados devem ser coletados do sistema para futuras quantificação dessas falhas.

Na terceira etapa, analisa-se os cenários de falhas, com o objetivo de descrever quais são os parâmetros relacionados com a degradação e se busca o conhecimento para o tratamento dos efeitos da degradação nos sistemas técnicos. Então, a partir das informações geradas pode-se nortear o processo de busca de soluções dos cenários apontados pela Etapa 2.

Note que a sistemática proposta foi elaborada para atuar de maneira genérica, o que a torna capaz de ser aplicada em outros tipos de sistemas técnicos. Outra vantagem da SisAD consiste na estruturação e documentação das informações acerca do processo de degradação dos sistemas técnicos.

Percebe-se que a sistemática proposta necessita de uma equipe técnica bem estruturada e com o mínimo entendimento, seja dos conteúdos de falhas ou do conhecimento do sistema em análise. Um facilitador com experiência neste tipo de análise também pode contribuir de maneira positiva na aplicação da SisAD.

A partir do processo de avaliação da sistemática, notou-se que é necessário melhorar a forma de apresentação da SisAD. Uma vez que foram necessárias interações adicionais para sanar detalhes referentes a utilização da sistemática, como, por exemplo, melhorar a explicação das atividades propostas nas etapas.

Para que a sistemática se torne mais efetiva, foi desenvolvido uma proposição de *software* (Apêndice B) para atuar de forma a auxiliar no arquivamento das informações sobre os processos de degradação. Além de ser uma importante ferramenta que facilita a aplicação da sistemática proposta. Contudo, a principal crítica recebida no processo de avaliação foi que o *software* proposto não atua como um guia na aplicação da sistemática desenvolvida. Todavia, é importante ressaltar que este não é o objetivo do *software* cujo o escopo de atuação está relacionado ao processo de transferência de conhecimento e o armazenamento de informações, por exemplo, com a inserção de conhecimento relacionado aos processos de degradação e a geração do Documento de Caracterização dos Processos de Degradação (D11) (Apêndice B).

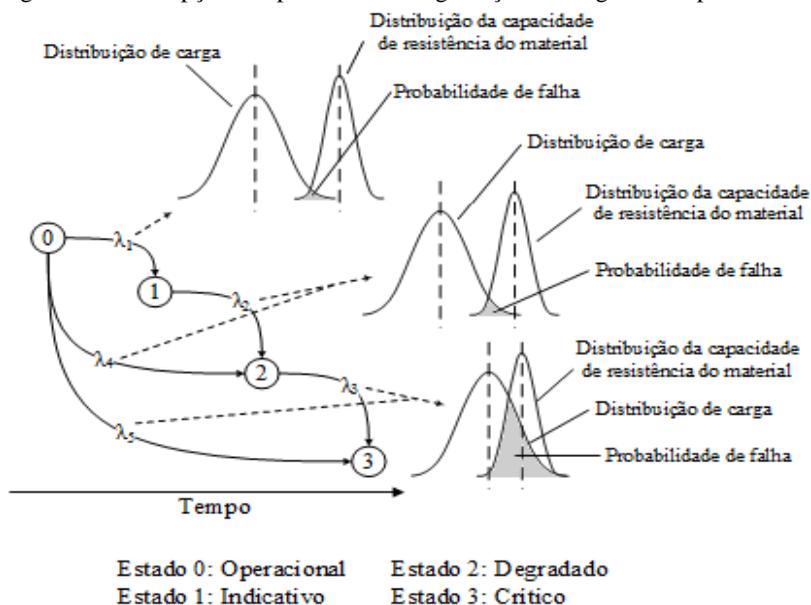
Ainda vale ressaltar que durante a discussões com os avaliadores foi evidenciada a necessidade de uma etapa referente ao planejamento das

atividades e uma atividade para o gerenciamento da aplicação das recomendações técnicas.

## 6.2.2 QUANTO AO ENTENDIMENTO DOS PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO

Outra percepção criada durante o desenvolvimento da presente dissertação relacionado com os processos de degradação pode ser visto na Figura 6.1. Observe que a distribuição da capacidade de resistência do material vai reduzindo devido ao dano gerado pela presença dos mecanismos de degradação, ao longo do ciclo de vida.

Figura 6.1 - Percepção dos processos de degradação ao longo do tempo



Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Billinton, 1992; O'Connor e Kleyner, 2012; Sakurada (2013).

Da mesma forma, os mecanismos de degradação, ao longo do ciclo de vida, em face do uso dos sistemas técnicos, contribuem para o aumento dos carregamentos, por causas das concentrações de tensões resultantes dos fluxos de energias requeridos para que o sistema técnico cumpra a função, como bem indicado na técnica de análise funcional.

De maneira geral, a Figura 6.1 busca sintetizar o entendimento sobre os processos de degradação e, concomitantemente, a tradução desse processo em relação às taxas de falhas. Esta figura é uma composição ente

a Figura 1.4 e as informações de degradação comentadas ao longo desta dissertação.

Na Figura 6.1, considera-se que o estado zero exprime o sistema técnico na condição de “tão bom quanto novo”. Esse estado há um fator de segurança entre os valores de da distribuição de carga e da capacidade de resistência do material. No decorrer do ciclo de vida (tempo), a região de interseção entre as distribuições vai aumentando causando o aumento da probabilidade de perda da função do sistema (falha funcional), pela transição por meio das taxas de falhas.

A forma como a distribuição de carga influencia a degradação depende de vários fatores. Por exemplo, as taxas de falhas  $\lambda_2$  e  $\lambda_4$  levam o sistema a uma mesma condição. Dado que as taxas de falhas  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  sejam muito menores que as taxa de falha  $\lambda_4$  a transição entre o estado 0 e o estado 2 acontece mais abruptamente, o que aumenta o nível de degradação ( $\alpha$ ).

Este nível de degradação ( $\alpha$ ), também, está correlacionado com o tempo de operação e a quantidade de processos de degradação que está presente no sistema técnico. Assim, quanto maior for o tempo de operação e mais mecanismo de degradação estiverem presentes, maior será a taxa de falha do sistema e mais rapidamente é a tendência de ocorrer a perda de função do sistema técnico.

### 6.2.3 QUANTO AOS OBJETIVOS PROPOSTOS

Diante do que foi exposto, considera-se que o objetivo geral que consistia em sistemática que permitisse organizar, analisar e caracterizar falhas por degradação em sistemas técnicos foi alcançado. Quanto aos objetivos específicos, conclui-se que:

- **Contribuir com o processo de análise de falhas em sistemas técnicos:** A SisAD contribui com a sistemática para o processo de análise de falha por meio de uma estruturação lógica e ordenada de procedimentos racionais usados para pesquisar e explicar as causas e efeitos das falhas por degradação e apontar ações técnicas para solução destes problemas.
- **Analisar os diferentes processos de degradação em sistemas técnicos:** Este objetivo foi cumprido com a revisão bibliográfica elaborada no Capítulo 3, onde foram apresentados os principais mecanismos de degradação encontrados na literatura. Além disso, foram elucidados indicadores que servem para o monitoramento destes mecanismos nos sistemas técnicos.

- **Selecionar técnicas empregadas na análise de falha, que melhor se aplicam aos processos de degradação:** Por meio do estudo de várias técnicas de análise de falhas, conseguiu-se selecionar as técnicas mais apropriadas. Tais técnicas (FMEA, FTA, CNEA e a Análise Funcional) foram selecionadas por possibilitarem evidenciar e caracterizar as falhas, e por possuírem uma capacidade de partilhar conhecimentos e complementar-se.
- **Aplicar a sistemática proposta em sistemas hidráulicos para fim de elucidação da aplicação da sistemática proposta e sua posterior avaliação:** Por meio da aplicação pode-se facilitar o entendimento da aplicação da SisAD e com a avaliação realizada pode-se identificar vantagens e desvantagens em sua aplicação. Além disto, pode-se organizar o conhecimento deste tipo de falha dentro da área de hidráulica.
- **Sugerir maneiras de organizar as informações coletadas durante a aplicação da sistemática desenvolvida (*templates de documentos*):** Este objetivo era uma parte implícita do trabalho, uma vez o próprio processo de desenvolvimento da sistemática inclui a estruturação e documentação do conhecimento para futuras aplicações. Fora isso, ainda foi proposto o *software* SisAD que atua no armazenamento de informações sobre os processos de degradação de sistemas técnicos.

### 6.3 Recomendações para trabalhos futuros

A seguir são propostas algumas recomendações de trabalhos futuros nesta área, como resultado para ampliação da sistemática desenvolvida, bem como para o conhecimento no tema:

- Ampliar a SisAD para incorporar para abranger, planejamento das atividades, o plano de comissionamento e aplicação das recomendações técnicas;
- Incorporar uma análise de custo utilizando conceitos como LCCA (*Life-Cycle Cost Analysis*);
- Aplicar em um problema real para verificar mais indicativos de melhoria da SisAD;
- Integrar outras técnicas, tais como IDEF0, ETA, Redes Bayesianas;
- Expandir mais detalhadamente para uma fronteira de projeto de novos produtos;

- Expandir as funcionalidades do *software* SisAD para abranger as etapas da sistemática;
- Propor um sistema baseado em conhecimento para auxiliar em futuras aplicações da SisAD.



## REFERÊNCIAS

- [1] ABS. 2004. **Guidance notes on Reliability-Centered Maintenance**. Houston. American Bureau of Shipping. 145p.
- [2] ALVES, G. D. **Sistema especialista protótipo para diagnóstico de falhas em um sistema hidráulico naval**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.
- [3] ANDREWS, David Richard. **The erosion of metals**. 1980. 156 f. Tese (Doutorado) - Curso de Physics, Department Of Physics, University Of Cambridge, Cambridge, 1980. Disponível em: <<https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/248773>>. Acesso em: 12 jun. 2016.
- [4] ASAFF, Yesid *et al.* Analysis of the Influence of Contaminants on the Biodegradability Characteristics and Ageing of Biodegradable Hydraulic Fluids. **Sv-jme**, [s.l.], v. 60, n. 6, p.417-424, 15 jun. 2014. Faculty of Mechanical Engineering. <http://dx.doi.org/10.5545/sv-jme.2013.1451>.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: confiabilidade a manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994. 37 p.
- [6] BACK, Nelson; OGLIARI, André; DIAS, Acires; SILVA, Jonny Carlos da. **Projeto integrado de produto: planejamento, concepção e modelagem**. Barueri, SP: Manole, 2008. 601p.
- [7] BELLINI, Vadis. **Metodologia para análise dos modos de falhas aplicada à segurança de condicionadores de ar**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008.
- [8] BHOJKAR, Amit. **Fault simulator for proportional solenoid valves**. Thesis (Master of Science), Department of Mechanical Engineering of the University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 2004. 115p.
- [9] BILLINTON, R.; ALLAN, R. N. **Reliability evaluation of engineering system**. 2ª Ed., New York: Plenum Press, 1992.
- [10] CALIL, L. F. P. **Metodologia de gerenciamento de risco: Foco na segurança e continuidade**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009.

- [11] CALLISTER, W. D., **Materials science and engineering: An introduction**. John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [12] CASTET, Jean-francois; SALEH, Joseph H.. Beyond reliability, multi-state failure analysis of satellite subsystems: A statistical approach. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 95, n. 4, p.311-322, abr. 2010. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2009.11.001>.
- [13] CASTET, J-F. Reliability, **Multi-State Failures and Survivability of Spacecraft and Space-Based Networks**. Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 2012.
- [14] COLLINS, J. A., **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: Uma Perspectiva de Prevenção de Falha**, LTC, Rio de Janeiro, 2006.
- [15] CROWE, Dana; FEINBERG, Alec (Ed.). **Design for Reliability**. [s.l.]: Crc Press, 2001. 256 p. (Electronics Handbook Series).
- [16] DA ROSA, E. **Análise de resistência mecânica: Mecânica da fratura e fadiga**. Agosto 2002. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em:  
<http://www.grante.ufsc.br/download/FADIGA.pdf>.
- [17] DE NEGRI, V. J. **Sistemas hidráulicos e pneumáticos para automação e controle**. Florianópolis. 2001. Apostila para disciplina de pós-graduação do Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. 2001.
- [18] DIAS, Acires *et al.* **Metodologia para Análise de Risco: Mitigação de perda de SF6 em disjuntores**. Ed. Studio e Arte Visual. Florianópolis, SC. 2013.
- [19] DIAS, Acires. Failure Analysis. In: Totten, G. and De Negri, V. J. (Eds.). **Handbook of Hydraulic Fluid Technology**. Second Edition. CRC Press. Chap.12, pp. 461-530, 2012.
- [20] DIAS, Acires. **Metodologia para análise da confiabilidade em freios pneumáticos automotivos**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1996.
- [21] ERICSON II, C. A. **Hazard analysis techniques for system safety**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

- [22] ESREDA. **Ageing of Components and Systems**. Eds.: Lars Petterson and Kaisa Simola. An ESReDA Working Group Report. Det Norske Veritas, 2006.
- [23] FRANC, Jean-pierre; MICHEL, Jean-marie (Ed.). **Fundamentals of Cavitation**. [s.l.]: Springer, 2005. (Fluid Mechanics and Its Applications). <http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-2233-6>.
- [24] GORJIAN, N.; MA, L.; MITTINTY, M.; YARLAGADDA, P.; Sun, Y. **A review on degradation models in reliability analysis**. In Proceedings of the 4th World Congress on Engineering Asset Management. Athens, 2009. p. 369-384.
- [25] GUIDA, M.; POSTIGLIONE, F.; PULCINI, G.. A time-discrete extended gamma process for time-dependent degradation phenomena. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 105, p.73-79, set. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2011.12.016>.
- [26] HOKSTAD, P.; HÅBREKKE, S.; JOHNSEN, R.; SANGESLAND, S. **Ageing and life extension for offshore facilities in general and for specific systems**. Norway: SINTEF Technology and Society Safety Research, 2010.
- [27] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60050-191**: International Electrotechnical Vocabulary - Chapter 191 – Dependability and Quality of Service. Geneva, 1990.
- [28] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61508**: Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems. Geneva, 1997.
- [29] JIN, Guang; MATTHEWS, David E.; ZHOU, Zhongbao. A Bayesian framework for on-line degradation assessment and residual life prediction of secondary batteries inspacecraft. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 113, p.7-20, maio 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2012.12.011>.
- [30] KAGUEIAMA, H. A. **Sistematização de técnicas de análise de falha e projeto para confiabilidade**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.

- [31] KAGUEIAMA, H. A. **Sistematização de técnicas de análise de falha e projeto para confiabilidade**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.
- [32] KIMURA, Yoshitsugu. Maintenance tribology: its significance and activity in Japan. **Wear**, [s.l.], v. 207, n. 1-2, p.63-66, jun. 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648\(96\)07472-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648(96)07472-8).
- [33] KIRCHSTEIGER, C. On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis. **Journal of loss prevention in the process industries**, v. 12, n. 5, p. 339 - 419, 1999. ISSN 0950-4230.
- [34] KUMAR, Ramesh; CLINE, Daren B.h.; GARDONI, Paolo. A stochastic framework to model deterioration in engineering systems. **Structural Safety**, [s.l.], v. 53, p.36-43, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2014.12.001>.
- [35] LAFRAIA, J. R. B. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- [36] LAI, Chin-diew; XIE, Min. **Stochastic Ageing and Dependence for Reliability**. [s.l.]: Springer-verlag New York, 2006. 418 p.
- [37] LAZZARONI, M.; CRISTALDI, L.; PERETTO, L.; RINALDI, P.; CATELANI, M. **Reliability Engineering: Basic Concepts and Applications in ICT**. New York: Springer, 2011.
- [38] LINSINGEN, I. Von. **Fundamentos de Sistemas Hidráulicos**. 2ª. Ed. revisada Florianópolis: Editora da UFSC, 2003. 399 p.
- [39] LISINGEN, I. Von.; DE NEGRI, V. J. Fundamentals of hydraulic systems and components. In: Totten, G. and De Negri, V. J. (Eds.). **Handbook of Hydraulic Fluid Technology**. Second Edition. CRC Press. Chap.1, pp. 1-51, 2012.
- [40] LISNIANSKI, Anatoly; FRENKEL, Ilia; DING, Yi. **Multi-state System Reliability Analysis and Optimization for Engineers and Industrial Managers**. New York: Springer, 2010.
- [41] LUNDTEIGEN, Mary Ann; RAUSAND, Marvin. Common cause failures in safety instrumented systems on oil and gas installations: Implementing defense measures through function testing. **Journal Of Loss Prevention In The Process Industries**, [s.l.], v. 20, n. 3, p.218-229, maio 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2007.03.007>.

- [42] MENDOZA, Y. E. A. **Sistematização do projeto de circuitos hidráulicos para o emprego de fluídos biodegradáveis**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013.
- [43] MITCHELL, Richard J., PIPPENGER, John J. **Fluid power maintenance basics and troubleshooting**. New York: Marcel Dekker, Inc., 1997.
- [44] MOGHADDASS, Ramin; ZUO, Ming J.. A parameter estimation method for a condition-monitored device under multi-state deterioration. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 106, p.94-103, out. 2012. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2012.05.004>.
- [45] MOHAMMADIAN, S. Hossein; AÏT-KADI, Daoud; ROUTHIER, François. Quantitative accelerated degradation testing: Practical approaches. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 95, n. 2, p.149-159, fev. 2010. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2009.09.009>.
- [46] MOUBRAY, J. **Reliability Centered Maintenance**. New York: Editora Industrial Press, Revisão da 2ª Edição, 2001.
- [47] MURTHY, D.N. P.; RAUSAND, Marvin; ØSTERÅS, Trond. **Product Reliability**. New York: Springer, 2008.
- [48] NAKAGAWA, T. **Stochastic Processes with Applications to Reliability Theory**. New York: Springer, 2011.
- [49] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment**. Washington. 2000. 348p.
- [50] NIKULIN, M.s. *et al* (Ed.). **Advances in Degradation Modeling: Applications to Reliability, Survival Analysis, and Finance**. [s.l.]: Birkhäuser Boston, 2010. 416 p. (Statistics for Industry and Technology).
- [51] O'CONNOR, P. D. T.; KLEYNER, A. **Practical reliability engineering**. 5ª Ed. New Jersey: John Wiley & Sons. 2012. 512p.
- [52] OREDA. **Offshore Reliability Data Handbook**. Trondheim. 2002. 372p.

- [53] OIL & GAS UK. **Guidance on the Management of Ageing and Life Extension for UKCS Oil and Gas Installations**. Issue 1. 2011.
- [54] PARK, Chanseok; PADGETT, W. J.. Accelerated Degradation Models for Failure Based on Geometric Brownian Motion and Gamma Processes. **Lifetime Data Anal**, [s.l.], v. 11, n. 4, p.511-527, dez. 2005. Springer Science + Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/s10985-005-5237-8>.
- [55] PARKER TRAINING. **Tecnologia Hidráulica Industrial**, Apostila M2001-1BR, São Paulo: Parker Hannifin Corporation, 1999.
- [56] PETERS, John. **Assessment of valve failures in the offshore oil & gas sector**. [s.l.]: Health and Safety Executive (HSE), 2003. 52 p.
- [57] POPOV, Valentin L. **Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications**. [s.l.]: Springer, 2010. 362 p.
- [58] PORCIÚNCULA, G. S. **Metodologia para análise de confiabilidade no projeto de sistemas automáticos**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009.
- [59] RAM, Mangey; MANGLIK, Monika. Stochastic behaviour analysis of a Markov model under multi-state failures. **International Journal Of System Assurance Engineering And Management**, [s.l.], v. 5, n. 4, p.686-699, 22 fev. 2014. Springer Science + Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/s13198-014-0234-5>.
- [60] RAMOS FILHO, J. R. B., DE NEGRI, V. J. **Model-Based Fault Detection for Hydraulic Servoproportional Valves**. In: 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power Proceedings, 2013. Linköping, Sweden.
- [61] RAUSAND, M.; HØYLAND, A. **System reliability theory: models, statistical methods, and applications**. 2ª Ed. New Jersey: John Wiley & Sons. 2004. 636p.
- [62] RAVI, D.; ANDREIS, B. **Hydraulic System, Operation and troubleshooting for engineers & technicians**. 1º Ed. New York: Elsevier Science & Technology Books, 2005.

- [63] REINERT, F. **Planejamento de produtos orientados pela atratividade ao usuário**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013.
- [64] SAE – J1739. 2000, **Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA), Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA), and Potential Failure Mode and Effects Analysis for Machinery (Machinery FMEA)**. Warrendale, Pennsylvania. SAE. 57p.
- [65] SAE - JA1011. 1999, **Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes**. Warrendale, Pennsylvania. SAE. 12p.
- [66] SAKURADA, E. Y. **As técnicas de análise dos modos de falha e seus efeitos e análise da árvore de falha no desenvolvimento e na avaliação de produtos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.
- [67] SAKURADA, E. Y. **Metodologia para análise de confiabilidade dinâmica**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013.
- [68] SANABRIA, J. A. **Metodologia para análise de confiabilidade em robôs com aplicação em robô paralelo**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.
- [69] SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de Engenharia Mecânica**, 7ª Edição, bookman editora, 2005.
- [70] SILVA, J. C. **The development of an expert system for hydraulic systems design focusing on Concurrent Engineering Aspects**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina / Lancaster University, Florianópolis, 1998.
- [71] SINATORA, A. **Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte**. Prova de Erudição, São Paulo, 2005.
- [72] SON, Khanh Le et al. Remaining useful life estimation based on stochastic deterioration models: A comparative study. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 112, p.165-175, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2012.11.022>.

- [73] SOSNOVSKIY, Leonid A.. **Tribo-Fatigue: Wear-Fatigue Damage and its prediction.** [s.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2005. 428 p. (Foundations of Engineering Mechanics).
- [74] STAPELBERG, R. F. **Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design.** New York: Springer, 2009.
- [75] STAMATIS, D. H., **Failure Mode and Effect Analysis - FMEA from Theory to Execution**, 2º Edição, ASQ Quality Press Milwaukee, Wisconsin, 2003.
- [76] STOETERAU, R. L. **Tribologia.** Janeiro 2004. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [77] TAKOUTSING, Pierre et al. **Wind Turbine Condition Monitoring: State-of-the-Art Review, New Trends, and Future Challenges.** Energies, [s.l.], v. 7, n. 4, p.2595-2630, 22 abr. 2014. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en7042595>
- [78] TOTTEN, George E.; WILL, David K.; FELDMANN, Dierk G. (Ed.). **Hydraulic Failure Analysis: Fluids, Components, and System Effects.** Philadelphia: ASTM, 2001. 601 p.
- [79] USA. MIL-STD-1626A: **procedure for performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis.** Military Standard, Naval Ship Engineering Center, Washington D.C.,1980.
- [80] VARGAS, Milton. **Metodologia da pesquisa tecnológica.** Rio de Janeiro: Editora Globo, 1985.
- [81] VIEIRA, Rodrigo de Souza *et al.* **Elementos de máquinas.** 5. ed. Florianópolis: UFSC, 2013. 328 p. (Apostila).
- [82] VINADÉ, C. A. C. **Sistematização do Processo de Projeto para Confiabilidade e Manutenibilidade Aplicado a Sistemas Hidráulicos e Implementação de um Sistema Especialista.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2003.
- [83] WU, Fan; NIKNAM, Seyed A.; KOBZA, John E. A cost effective degradation-based maintenance strategy under imperfect repair. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 144, p.234-243, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2015.08.002>.

- [84] XU, Zhengguo; ZHOU, D.h.. A degradation measurements based real-time reliability prediction method. **Ifac Proceedings Volumes**, [s.l.], v. 39, n. 13, p.950-955, 2006. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.3182/20060829-4-cn-2909.00158>.
- [85] YINGKUI, Gu; JING, Li. Multi-State System Reliability: A New and Systematic Review. **In 2012 International Workshop on Information and Electronics Engineering**, Procedia Engineering 2012 29: 531-536.
- [86] YOU, M.-y.; MENG, G.. A predictive maintenance scheduling framework utilizing residual life prediction information. **Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part e: Journal of Process Mechanical Engineering**, [s.l.], v. 227, n. 3, p.185-197, 30 ago. 2012. SAGE Publications.  
<http://dx.doi.org/10.1177/0954408912458868>.
- [87] ZANÓN, P. S. **Modelagem e simulação de um sistema de detecção de falhas em válvulas distribuidoras**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2014.
- [88] ZHANG, Xiangjun; GUI, Changlin. **An Intelligent System for Tribological Design in Engines**. [s.l.]: Elsevier, 2004. 200 p. 46 v. (Tribology and Interface Engineering Series).

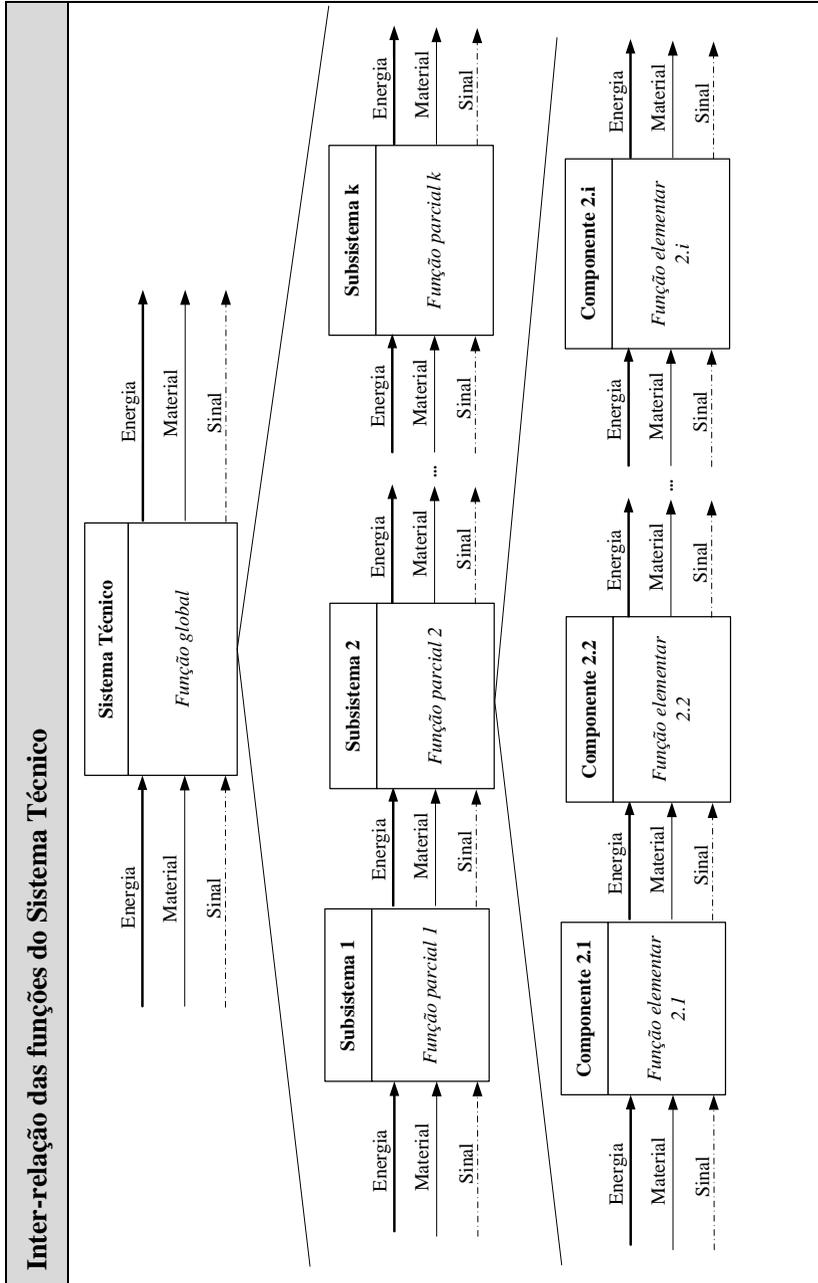


**APÊNDICE A – *TEMPLATES* DE DOCUMENTAÇÃO**

## APÊNDICE A.1 – Documentação de caracterização do sistema técnico

	<p>Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos Universidade Federal de Santa Catarina</p>
<b>Documento de Caracterização do Sistema Técnico</b>	
<b>Responsável técnico:</b>	
<b>Data elaboração:</b>	
<b>Data de modificação:</b>	

<b>Desdobramento das funções do Sistema Técnico</b>			
<b>Sistema:</b> <i>Função global do sistema</i>			
	<b>Subsistema 1:</b> <i>Função parcial 1</i>		
		<b>Componentes 1.1:</b> <i>Função elementar 1.1</i>	
		<b>Componentes 1.2:</b> <i>Função elementar 1.2</i>	
		⋮	⋮
		<b>Componentes 1.i:</b> <i>Função elementar 1.i</i>	
	<b>Subsistema 2:</b> <i>Função parcial 2</i>		
		<b>Componentes 2.1:</b> <i>Função elementar 2.1</i>	
		<b>Componentes 2.2:</b> <i>Função elementar 2.2</i>	
		⋮	⋮
		<b>Componentes 2.i:</b> <i>Função elementar 2.i</i>	
⋮	⋮	⋮	⋮
	<b>Subsistema k:</b> <i>Função parcial k</i>		
		<b>Componentes k.1:</b> <i>Função elementar k.1</i>	
		<b>Componentes k.2:</b> <i>Função elementar k.2</i>	
		⋮	⋮
		<b>Componentes k.j:</b> <i>Função elementar k.j</i>	



## APÊNDICE A.2 – Documento de Priorização de Análise

	<p>Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos Universidade Federal de Santa Catarina</p>
<b>Documento de Priorização de Análise</b>	
<b>Responsável técnico:</b>	
<b>Data elaboração:</b>	
<b>Data de modificação:</b>	

<b>Fontes de dados de Falhas</b>	
<b>Fonte</b>	<b>Comentário</b>
<b>Tratamentos dos dados</b>	
<b>Ferramentas utilizadas</b>	<b>Justificativa</b>
<b>Análises frente aos dados tratados</b>	

Subsistemas/ Componentes	Taxa de falha ( $\lambda$ ) (x 10 <sup>-6</sup> horas)			
	Crítica	Degradada	Indicativo	TOTAL

Subsistemas/ Componentes	Probabilidade Acumulada de Falha

Identificar os subsistemas críticos	
Subsistemas/Componentes	Justificava e comentários

### APÊNDICE A.3 – Documento de Caracterização dos Cenários de Falha

	<p>Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos Universidade Federal de Santa Catarina</p>
<b>Documento de Caracterização dos Cenários de Falha</b>	
<b>Responsável técnico:</b>	
<b>Data elaboração:</b>	
<b>Data de modificação:</b>	

<b>Registro das Técnicas de Análise</b>	
<b>Técnica</b>	<b>Fontes de bases para utilização</b>
FMEA	
FTA	
CNEA	
Outras	

<b>Caracterização da Falha</b>					
<b>Subsistema/ Componente</b>	<b>Respon- sável</b>	<b>Data</b>	<b>Técnica utilizada</b>	<b>Justificativa e comentário</b>	<b>Anexo</b>

## APÊNDICE A.4 – Documento de Recomendações Técnicas

	<p>Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos Universidade Federal de Santa Catarina</p>
<b>Documento de Recomendações Técnicas</b>	
<b>Responsável técnico:</b>	
<b>Data elaboração:</b>	
<b>Data de modificação:</b>	

<b>Estudo de Soluções</b>		
<b>Fonte</b>	<b>Tipo de fonte (Artigos Científicos, Relatório de Fabricantes, Catálogos)</b>	<b>Comentário</b>
<b>Experiências Similares</b>		

<b>Registro das Recomendações</b>				
<b>Subsistema/ componente</b>	<b>Modo de falha ou causa da degradação</b>	<b>Recomendação Técnica</b>	<b>Justificativas</b>	<b>Objetivos</b>

<b>Procedimentos, Recomendações e Ações</b>			
<b>Tipo do Documento</b>	<b>Responsável</b>	<b>Data</b>	<b>Anexo</b>

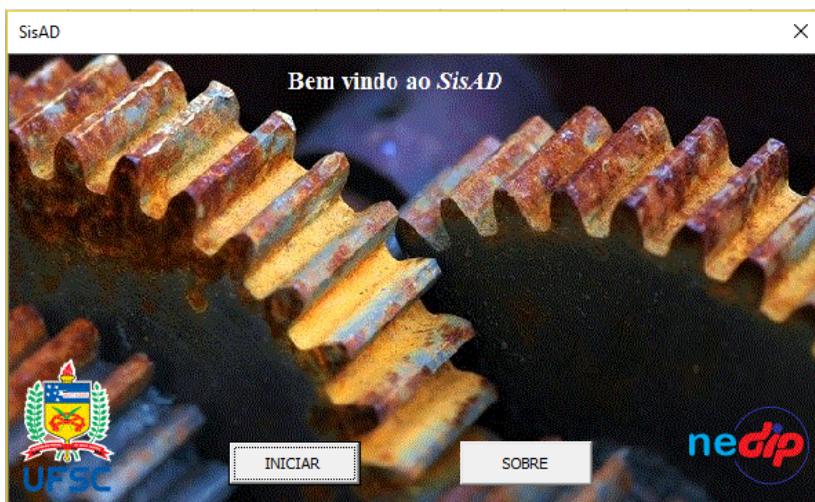
## APÊNDICE B – SOFTWARE SISAD

Este apêndice trará do desenvolvimento do piloto do *software* SisAD. Este software tem o objetivo facilitar e dinamizar o processo de arquivamento das informações acerca dos processos de degradação de sistemas técnicos.

O SisAD desenvolvido em *Visual Basic for Applications* do Excel. Apesar do VBA não ser uma linguagem plenamente orientada a objetos, tem como consequência faz com que não suporte algumas propriedades inerentes as linguagens orientadas a objeto, como por exemplo, a ausência ou deficiência de herança e polimorfismo. A escolha por essa linguagem deu-se pela popularidade do pacote Office em diversos setores da engenharia, pela facilidade de programação e pela capacidade de armazenar uma grande quantidade de informação.

A Figura mostra a tela inicial do *software* ao se executar o arquivo Excel pela primeira vez. Ao iniciar são disponibilizados dois botões: INICIAR e SOBRE.

Figura B.1 - Tela inicial do *software* SisAD



Fonte: O autor.

Ao clicar no botão SOBRE é disponibilizado uma tela onde são apresentados a proposta da SisAD e os responsáveis pelo desenvolvimento. A Figura B.2 mostra a tela apresentada após ao clique

do botão. Ao selecionar o botão VOLTAR nesta tela retorna-se a tela inicial.

Figura B.2 - Tela SOBRE do *software* piloto desenvolvido



Fonte: O autor.

Ao clicar no botão INICIAR é disponibilizado uma tela onde são apresentados três campos. O primeiro está relacionado com o sistema técnico, o segundo com o subsistema presente no sistema e, por último, um campo onde está localizado os principais mecanismos de degradação para cada um dos subsistemas. A Figura B.3 mostra este layout.

À medida que se seleciona um sistema técnico é mostrado, no campo SUBSISTEMAS TÉCNICOS, os subsistemas cadastrados para cada sistema técnico. Da mesma forma, que selecionando um subsistema técnico é mostrado os principais mecanismos de degradação presentes em cada um destes subsistemas.

Neste *layout*, existem sete botões. O botão VOLTAR, retorna a tela inicial do *software*. Os botões de cadastro e remoção (para cada um dos três campos) foram pensados para possibilitar ao usuário inserir e remover sistemas, subsistemas ou mecanismo de degradação.

Ao escolher, o botão CADRASTRO DE NOVO SISTEMA, é apresentado uma nova tela. Nesta tela é possível cadastrar um novo sistema técnico. Vale ressaltar que o usuário não pode incluir um sistema já cadastrado. A Figura B.4 mostra a *layout* desta tela.

Após o usuário cadastrar um novo sistema técnico, então passasse para uma nova tela, no qual o permite inserir os subsistemas pertencentes a este sistema técnico inserido. A Figura B.5 apresenta o layout dessa tela de cadastro.

Para inserir um novo subsistema deve-se digitar o nome no campo A e apertar o botão CADRASTRAR DE NOVO SISTEMA e no campo B vai atualizando e mostrando a lista de subsistemas inseridos.

Figura B.3 - *Layout* da tela principal do SisAD

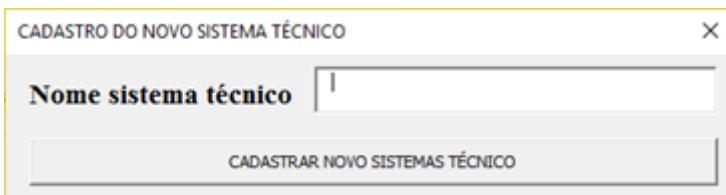
The image shows a software interface titled "SisAD" with a close button (X) in the top right corner. The interface is organized into three main sections, each with a list of items and two buttons to the right:

- Tipos de sistemas técnicos:** A list containing "Sistemas Eletroeletrônicos", "Sistemas Mecânicos" (highlighted in blue), "Sistemas Mecatrônicos", and "Softwares". To the right are buttons for "CADASTRAR NOVO SISTEMAS TÉCNICO" and "REMOVER SISTEMA TÉCNICO".
- Subsistemas técnicos:** A list containing "Mancais (deslizamento ou rolamento)", "Manivelas e eixos de manivela", "Molas", "Parafusos de potência", "Sistemas Hidráulicos" (highlighted in blue), "Vasos de pressão", and "Volante e rotores de alta velocidade". To the right are buttons for "CADASTRAR NOVO SUBSISTEMA" and "REMOVER SUBSISTEMA".
- Principais mecanismos de degradação:** A list containing "Cavitação", "Corrosão", "Desgaste Abrasivo", "Desgaste Adesivo", "Desgaste Erosivo", and "Fadiga". To the right are buttons for "CADASTRAR NOVO MECANISMO" and "REMOVER MECANISMO".

At the bottom right of the interface is a "VOLTAR" button.

Fonte: O autor.

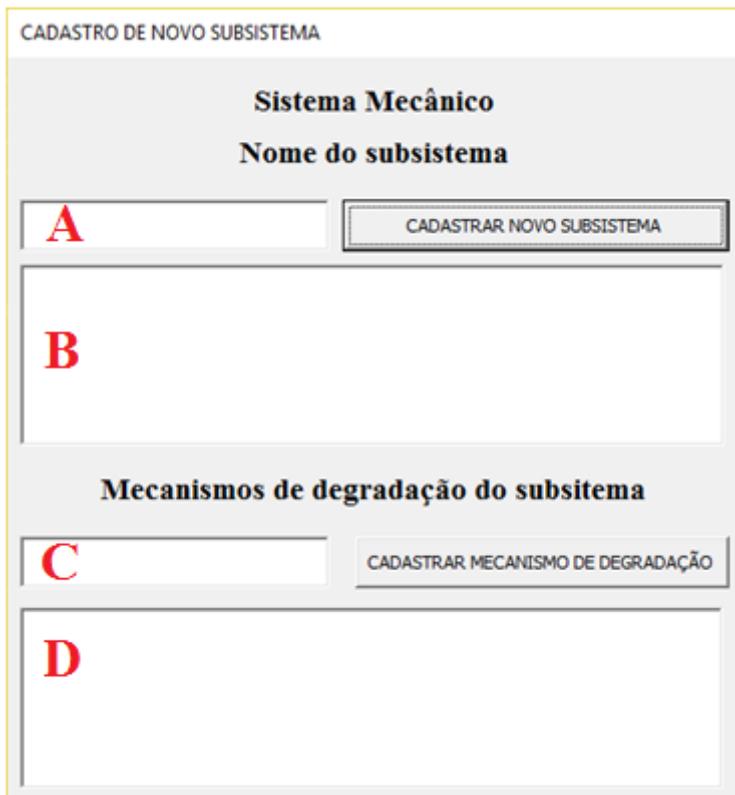
Figura B.4 - Tela para cadastro de um novo sistema técnico



The screenshot shows a web form titled "CADASTRO DO NOVO SISTEMA TÉCNICO" with a close button (X) in the top right corner. Below the title is a label "Nome sistema técnico" followed by a text input field containing a single vertical bar character "|". At the bottom of the form is a button labeled "CADASTRAR, NOVO SISTEMAS TÉCNICO".

Fonte: O autor.

Figura B.5 - Tela para cadastro de subsistema técnico



The screenshot shows a web form titled "CADASTRO DE NOVO SUBSISTEMA". The form is divided into two main sections. The first section is titled "Sistema Mecânico" and "Nome do subsistema". It features a dropdown menu with the letter "A" in red, a button labeled "CADASTRAR NOVO SUBSISTEMA", and a large empty text area with the letter "B" in red. The second section is titled "Mecanismos de degradação do subsistema". It features a dropdown menu with the letter "C" in red, a button labeled "CADASTRAR MECANISMO DE DEGRADAÇÃO", and a large empty text area with the letter "D" in red.

Fonte: O autor.

Para se cadastrar os principais mecanismos de degradação deve-se, então, selecionar o subsistema no campo B e digitar no campo C o mecanismo de degradação referente a este subsistema. Da mesma forma, o campo D vai listando os mecanismos de degradação inseridos.

Ao clicar no botão para cadastrar o mecanismo parte-se, então para uma outra tela, na qual deve ser preenchida com as informações do referente ao mecanismo. Essas informações consistem em um conhecimento sobre o mecanismo, uma ilustração e as referências utilizadas e indicadas para um aprofundamento de conhecimento sobre o mecanismo. A Figura B.6 mostra o *layout* dessa tela.

Após a inserção de todos os mecanismos e subsistemas, então retorna-se para a tela inicial, na qual mostrará também o novo sistema adicionado.

Ao clicar no CADRASTRO DE SUBSISTEMA na tela inicial do *software* (Figura B.1), o usuário é direcionado para a tela de cadastro de um novo subsistema. Vale salientar que o novo subsistema será inserido no sistema técnico selecionado no campo de tipos de sistemas técnicos e, caso, não tenha sido selecionado nenhum o programa acusa. O mesmo se aplica para o botão de REMOVER SUBSISTEMA.

Figura B.6 - Tela para cadastro de subsistema técnico

CADASTRO DE INFORMAÇÃO SOBRE O MECANISMO

IMPORTAR IMAGEM

**Conhecimento**

**Ilustração**

**Referência**

CADASTRAR VOLTAR

Fonte: O autor.

Da mesma maneira, para acionar funcionalidade dos botões REMOVER MECANISMO e CADASTRAR MECANISMO na tela inicial (Figura ), deve-se selecionar previamente o sistema técnico e o subsistema. Dado essas condições, ao se clicar no botão de

CADASTRAR MECANISMO, o usuário é direcionado a tela de cadastro das informações sobre o mecanismo.

Na tela de início, ao se clicar no mecanismo, o usuário é encaminhado uma tela semelhante a tela de cadastro de informações referente ao mecanismo. Nesta tela, é mostrado todas as informações catalogadas sobre o mesmo (conhecimento, ilustração e referências). Além disso, pode-se nesta tela imprimir ou salvar estas informações na forma de um documento. Neste documento é apresentado o sistema técnico, o subsistema e o mecanismo referente. A Figura B.7 e a Figura B.8 mostram o *layout* e o documento gerado, respectivamente.

Figura B.7 - Tela acerca das informações cadastradas para um mecanismo

MECANISMO DE DEGRADAÇÃO ×

**Cavitação**

**Conhecimento**

É um mecanismo de degradação que ocorre a formação de bolhas no fluido numa região em que a pressão reduz para níveis abaixo da pressão de vapor, resultando em perda de metal local pelo estouro das bolhas. Em termos gerais, a cavitação é prejudicial tanto para bomba quanto para o sistema hidráulico uma vez que induz a bomba a fornecer uma vazão anormal ou instável, além de provocar um ruído excessivo. Existem várias causas para a cavitação, tais como: excessiva rotação da bomba; óleo com alta viscosidade; diâmetro interno insuficiente da tubulação de sucção da bomba; excessiva perda de carga na tubulação de sucção da bomba; filtro de sucção sujo ou obstruído; filtro de ar no reservatório bloqueado e conexão de entrada da bomba muito alta com relação ao nível de óleo do reservatório. O dano da cavitação pode ser avaliado pelo módulo de resiliência do material.

**Ilustração**



IMPRIMIR

**Referência**

DIAS, Acires. Failure Analysis. In: Totten, G. and De Negri, V. J. (Eds.). Handbook of Hydraulic Fluid Technology. Second Edition. CRC Press. Chap 12, pp. 461-530, 2012.

FRANC, Jean-pierre; MICHEL, Jean-marie (Ed.). Fundamentals of Cavitation. [s.l.]: Springer, 2005. (Fluid Mechanics and Its Applications). <http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-2233-6>.

TOTTEN, George E.; WILL, David K.; FELDMANN, Dierk G. (Ed.). Hydraulic Failure Analysis: Fluids, Components, and System Effects.

Fonte: O autor.

Vale-se ressaltar que nem todas as funcionalidades estão implementadas no SisAD como, por exemplo, os botões de remoção. No entanto, este *software* é um piloto que deve servir como base para implementação, geração e gerenciamento do conhecimento sobre os processos de degradação dos sistemas técnicos.

Figura B.8 - Documento gerado para impressão (Documento de Caracterização dos Processos de Degradação de Sistemas Técnicos – D11)

**Sistema Técnico**  
Sistemas Mecânicos

**Subsistema Técnico**  
Sistemas Hidráulicos

**Mecanismo de Degradação**  
Cavitação

**Ilustração**



**Conhecimento**

É um mecanismo de degradação que ocorre a formação de bolhas no fluido numa região em que a pressão reduz para níveis abaixo da pressão de vapor, resultando em perda de metal local pelo o estouro das bolhas. Em termos gerais, a cavitação é prejudicial tanto para bomba quanto para o sistema hidráulico uma vez que induz a bomba a fornecer uma vazão anormal ou instável, além de provocar um ruído excessivo. Existem várias causas para a cavitação, tais como: excessiva rotação da bomba; óleo com alta viscosidade; diâmetro interno insuficiente da tubulação de sucção da bomba; excessiva perda de carga na tubulação de sucção da bomba; filtro de sucção sujo ou obstruído; filtro de ar no reservatório bloqueado e conexão de entrada da bomba muito alta com relação ao nível de óleo do reservatório. O dano da cavitação pode ser avaliado pelo módulo de resiliência do material.

**Referência**

DIAS, Aires. Failure Analysis. In: Totten, G. and De Negri, V. J. (Eds.). Handbook of Hydraulic Fluid Technology. Second Edition. CRC Press. Chap.12, pp. 461-530, 2012.

FRANC, Jean-pierre; MICHEL, Jean-marie (Ed.). Fundamentals of Cavitation. [s.l.]: Springer, 2005. (Fluid Mechanics and Its Applications). <http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-2233-6>.

TOTTEN, George E.; WILL, David K.; FELDMANN, Dietrich G. (Ed.). Hydraulic Failure Analysis: Fluids, Components, and System Effects. Philadelphia: ASTM, 2001. 601 p.

Fonte: O autor.

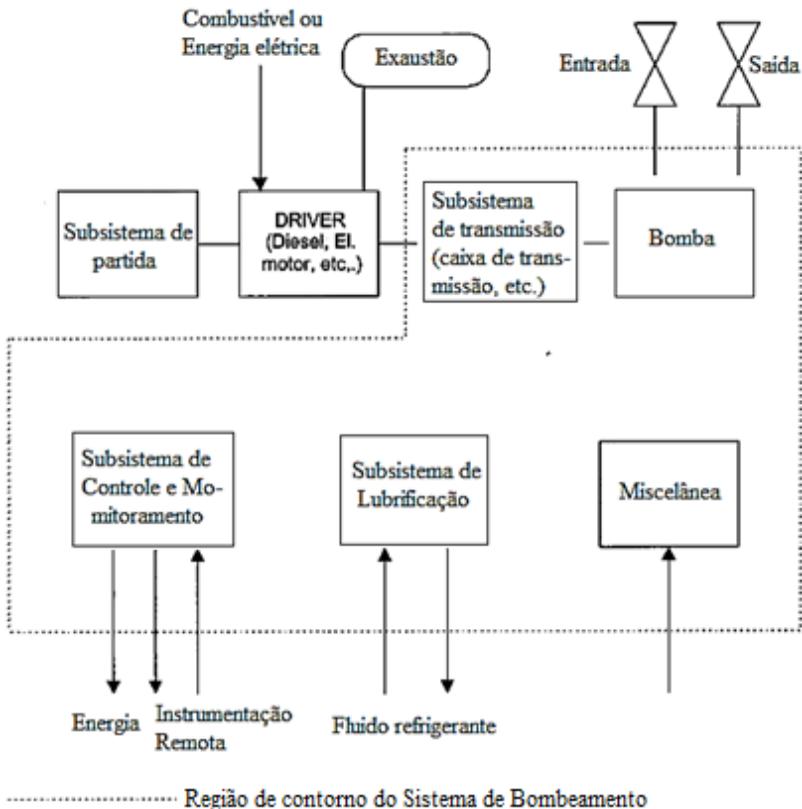


## APÊNDICE C – TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO

Este apêndice é um sumário do tratamento das informações contidas no OREDA (2002) para o Sistema de Bombeamento (SB) considerada no Capítulo 5.

De acordo com o OREDA (2002) o SB é dividido em cinco subsistemas que por sua vez é subdividido em itens. A Figura C.1 mostra a região de contorno que é considerado o SB e o Quadro C.1 mostra os itens manuteníveis de cada um dos subsistemas.

Figura C.1 - Delimitação do Sistema de Bombeamento



Fonte: OREDA (2002, p. 170, tradução nossa).

Quadro C.1 - Divisão do Sistema de Bombeamento em itens manuteníveis

Sistema de Bombeamento ( <i>Pump</i> )			
Miscelânea ( <i>Miscellaneous</i> )		Subsistema transmissão ( <i>Power transmission</i> )	
Item	Tradução nossa	Item	Tradução nossa
<i>Cooling/heating system</i>	Sistema de resfriamento/aquecimento	<i>Bearing</i>	Rolamento
<i>Filter, cyclone</i>	Filtro, ciclone	<i>Coupling to driven unit</i>	Acoplamento da unidade movida
<i>Pulsation damper</i>	Amortecedor de vibrações	<i>Coupling to driver</i>	Acoplamento da unidade motora
<i>Purge air</i>	Purgador de ar	<i>Gearbox/var. drive</i>	Caixa de transmissão
		<i>Instruments</i>	Sensores
		<i>Lubrication</i>	Lubrificação
		<i>Seals</i>	Vedações

Fonte: OREDA (2002, p. 171, tradução nossa).

Quadro C.1 - Divisão do Sistema de Bombeamento em itens manuteníveis (continuação)

<b>Sistema de Bombeamento (Pump)</b>			
<b>Subsistema de Controle e Monitoramento (Control and Monitoring)</b>		<b>Subsistema de lubrificação (Lubrication system)</b>	
<b>Item</b>	<b>Tradução nossa</b>	<b>Item</b>	
<b>Item</b>	<b>Tradução nossa</b>	<b>Tradução nossa</b>	
<i>Actuating device</i>	Atuador	<i>Cooler</i>	Ventiladores
<i>Cabling &amp; junction boxes</i>	Caixas de cabeamento e junção	<i>Filter</i>	Filtro
<i>Control Unit</i>	Unidade de controle	<i>Instruments</i>	Sensores
<i>Cooler</i>	Ventiladores	<i>Oil</i>	Fluido lubrificante
<i>Filter</i>	Filtro	<i>Pump w/motor</i>	Bomba com motor
<i>Instruments</i>	Sensores	<i>Reservoir w/heating system</i>	Reservatório com sistema de aquecimento
<i>Internal power supply</i>	Fonte interna de alimentação	<i>Seals</i>	Vedações
<i>Monitoring</i>	Monitoramento	<i>Valves &amp; piping</i>	Válvulas e tubulações
<i>Valves</i>	Válvulas		

Fonte: OREDA (2002, p. 171, tradução nossa).

Quadro C.1 - Divisão do Sistema de Bombeamento em itens manuteníveis (continuação)

Sistema de Bombeamento ( <i>Pump</i> )	
Subsistema Bomba ( <i>Pump</i> )	
Item	Tradução nossa
<i>Casing</i>	Caraça
<i>Cylinder liner</i>	Camisa do cilindro
<i>Diaphragm</i>	Diafragma
<i>Impeller</i>	Rotor
<i>Instruments</i>	Sensores
<i>Piston</i>	Pistão
<i>Radial bearing</i>	Rolamento radial
<i>Seals</i>	Vedações
<i>Shaft</i>	Eixo
<i>Support</i>	Suporte
<i>Thrust bearing</i>	Mancal de rolamento
<i>Valves &amp; piping</i>	Válvulas e tubulações

Fonte: OREDA (2002, p. 171, tradução nossa)

O OREDA (2002) traz uma lista de modos de falha e utiliza os mesmos para construir uma tabela demonstrando a porcentagem de falhas para cada item por modo de falha. O Quadro C.2 mostra os modos de falhas considerados no OREDA (2002) e a Tabela C.1 mostra estas porcentagens.

Quadro C.2 - Lista de modos de falhas para o OREDA

Modo de falha	Sigla
Leitura anormal ( <i>Abnormal instrument reading</i> )	AIR
Pane, parada, quebra ( <i>Breakdown</i> )	BRD
Saída instável ( <i>Erratic output</i> )	ERO
Vazamento externo – Processo ( <i>External leakage – process médium</i> )	ELP
Vazamento externo – Utility ( <i>External leakage – utility médium</i> )	ELU
Falha de partida ( <i>Fail to start on demand</i> )	FTS
Falha de parada ( <i>Fail to stop on demand</i> )	STP
Saída elevada ( <i>High output</i> )	HIO
Vazamento interno ( <i>Internal leakage</i> )	INL
Saída insuficiente ( <i>Low output</i> )	LOO
Problemas secundários em serviço (Minor in-service problems)	SER

Fonte: OREDA (2002, p. 172, tradução nossa).

Quadro C.2 - Lista de modos de falhas para o OREDA (continuação)

<b>Modo de falha</b>	<b>Sigla</b>
Ruído ( <i>Noise</i> )	NOI
Outros ( <i>Other</i> )	OTH
Superaquecimento ( <i>Overheating</i> )	OHE
Desvio de parâmetro ( <i>Parameter deviation</i> )	PDE
Parada inesperada ( <i>Spurious stop</i> )	UST
Estrutura deficiente ( <i>Structural deficiency</i> )	STD
Desconhecido ( <i>Unknown</i> )	UNK
Vibração excessiva ( <i>Vibration</i> )	VIB

Fonte: OREDA (2002, p. 172, tradução nossa).

Tabela C.1 - Porcentagem de falha de item manuteníveis por modo de falha

Item	Vedações	Eixo	Sub- unidade	Suporte	Mancal axial	Desco- nhcido	Válvula
AIR	0,00	0,04	0,12	0,00	0,00	1,40	0,04
BRD	0,08	0,17	0,58	0,00	0,12	0,21	0,00
ELP	5,85	0,00	0,10	0,00	0,00	0,99	2,31
ELU	7,18	0,04	0,21	0,00	0,10	1,11	1,57
ERO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	0,37
FTS	0,00	0,04	0,33	0,00	0,00	0,87	0,04
HIO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00
INL	0,57	0,00	0,08	0,00	0,00	0,21	1,53
LOO	0,04	0,00	0,54	0,00	0,00	1,11	0,17
NOI	0,08	0,12	0,04	0,00	0,00	0,37	0,23
OHE	0,12	0,04	0,00	0,00	0,04	0,08	0,00
OTH	0,21	0,00	0,50	0,00	0,00	1,20	1,03
PDE	0,08	0,00	0,25	0,00	0,00	0,29	0,50
SER	0,29	0,00	0,37	0,00	0,04	1,73	1,32
STD	0,56	0,04	0,45	0,12	0,19	0,62	0,17
STP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
UNK	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,00
UST	0,35	0,08	0,37	0,00	0,00	1,53	0,10
VIB	0,01	0,11	0,41	0,91	0,18	0,58	0,00

Fonte: Adaptado de OREDA (2002, p. 176-177).

Tabela C.1 - Porcentagem de falha de item manuteníveis por modo de falha (continuação)

Item	Atuador	Rolamento	Caixas de cabeamento e junção	Caraça	Válvula de retenção	Unidade de controle	Ventiladores	Sistema de resfriamento/aquecimento	Acoplamento da unidade movida	Acoplamento da unidade motora	Camisa do cilindro	Diafragma							
	AIR	BRD	ELP	ELU	ERO	FTS	HIO	INL	LOO	NOI	OHE	OTH	PDE	SER	STD	STP	UNK	UST	VIB
Modo de falha	0,41	0,00	0,56	0,00	0,00	0,95	0,00	0,04	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,04	0,00	0,47	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,06	0,00	0,25	0,00	0,00	0,29	0,25	0,12	0,04	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,12	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,25	0,04	0,04	0,00	0,00	0,12	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,25	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,50	0,04	0,21	0,04	0,00	0,21	0,12	0,41	0,10	0,10	0,10	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,12	0,00	0,27	0,00	0,12	0,12	0,00	0,37	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,08	0,10	0,08	0,00	0,00	0,29	0,00	0,00	0,12	0,04	0,12	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,08	0,00	0,08	0,00	0,02	0,00	0,00	0,04	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Adaptado de OREDA (2002, p. 176-177).

Tabela C.1 - Porcentagem de falha de item manuteníveis por modo de falha (continuação)

Item	Filtro	Filtro, ciclone	Caixa de transmissão	Rotor	Sensor de fluxo	Sensor geral	Sensor de nível	Sensor de pressão	Sensor de velocidade	Sensor de temperatura	Sensor de vibração	Fonte de alimentação interna
	<b>AIR</b>	0,04	0,00	0,00	0,00	6,60	1,03	0,33	4,40	0,37	3,65	1,94
<b>BRD</b>	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>ELP</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>ELU</b>	0,25	0,12	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,21	0,00	0,08	0,04	0,00
<b>ERO</b>	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,04	0,00	0,00
<b>FTS</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00
<b>HIO</b>	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>INL</b>	0,04	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>LOO</b>	0,00	0,04	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>NOI</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>OHE</b>	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00
<b>OTH</b>	0,33	0,04	0,04	0,00	0,04	0,21	0,00	0,08	0,12	0,00	0,00	0,00
<b>PDE</b>	0,17	0,00	0,00	0,00	0,62	0,08	0,04	0,37	0,00	0,29	0,45	0,00
<b>SER</b>	0,54	0,12	0,04	0,00	0,17	0,45	0,17	0,50	0,00	0,56	0,45	0,04
<b>STD</b>	0,08	0,00	0,04	0,06	0,04	0,00	0,04	0,12	0,00	0,02	0,00	0,00
<b>STP</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>UNK</b>	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04	0,00
<b>UST</b>	0,00	0,00	0,12	0,08	0,12	0,17	0,04	0,50	0,00	0,54	0,33	0,08
<b>VIB</b>	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,39	0,00

Fonte: Adaptado de OREDA (2002, p. 176-177).

Tabela C.1 - Porcentagem de falha de item manuteníveis por modo de falha (continuação)

Item	Lubrificação	Monitoração	Óleo	Outros	Tubulação	Pistão	Amortecedor de pulsação	Bomba com motor	Purgador de ar	Mancal radial	Reservatório	Reservatório com sistema de aquecimento									
	AIR	BRD	ELP	ELU	ERO	FTS	HIO	INL	LOO	NOI	OHE	OTH	PDE	SER	STD	STP	UNK	UST	VIB		
Modo de falha	0,00	0,89	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
	0,00	0,00	0,00	0,04	1,57	0,72	0,25	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	0,04	0,00	0,21	0,41	1,63	0,08	0,04	0,41	0,04	0,02	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	
	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,14	0,01	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,76	0,21	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,04	0,12	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,04	0,12	0,08	0,29	0,00	0,08	0,04	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,08	0,04	0,50	0,45	0,00	0,00	0,08	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,08	0,14	0,45	0,58	0,33	0,00	0,00	0,04	0,04	0,08	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	0,00	0,00	0,00	0,12	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Adaptado de OREDA (2002, p. 176-177).

Cruzando as informações contidas no Quadro C.1 e na Tabela C.1 pode-se calcular as porcentagens de falhas para cada um dos subsistemas. No entanto, alguns dos itens descritos não se pode encaixar em na divisão apresentado pelo OREDA (2002). Dessa maneira, foram agrupados como indefinido. Estas porcentagens podem ser vistas na Tabela C.2 a C.7.

Tabela C.2 - Porcentagem de falhas para Subsistema de Transmissão

		SUBSISTEMA DE TRANSMISSÃO					
		Lubrificação	Rolamento	Acoplamento da unidade movida	Acoplamento da unidade motora	Caixa de transmissão	Vedações*
<b>MODO DE FALHA</b>	<b>AIR</b>	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00
	<b>BRD</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,03
	<b>ELP</b>	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	1,95
	<b>ELU</b>	0,04	0,06	0,12	0,04	0,00	2,39
	<b>ERO</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00
	<b>FTS</b>	0,00	0,04	0,00	0,12	0,00	0,00
	<b>HIO</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>INL</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19
	<b>LOO</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
	<b>NOI</b>	0,00	0,04	0,25	0,00	0,00	0,03
	<b>OHE</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04
	<b>OTH</b>	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04	0,07
	<b>PDE</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
	<b>SER</b>	0,08	0,04	0,10	0,10	0,04	0,10
	<b>STD</b>	0,00	0,12	0,37	0,04	0,04	0,19
	<b>STP</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>UNK</b>	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00
	<b>UST</b>	0,00	0,10	0,12	0,04	0,12	0,12
<b>VIB</b>	0,00	0,08	0,04	0,12	0,00	0,00	
<b>TOTAL</b>	0,13	0,57	1,09	0,51	0,37	5,15	

<b>SOMATÓRIO</b>	<b>7,78 %</b>
------------------	---------------

Fonte: Adaptado de OREDA (2002).

Tabela C.3 - Porcentagem de falhas para Subsistema Miscelânea

		SUBSISTEMA MISCELÂNEA			
		Sistema de resfriamento/aquecimento	Filtro, ciclone	Amortecedor de pulsação	Purgador de ar
<b>MODO DE FALHA</b>	<b>AIR</b>	0,04	0,00	0,00	0,00
	<b>BRD</b>	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>ELP</b>	0,00	0,00	0,25	0,00
	<b>ELU</b>	0,25	0,12	0,04	0,04
	<b>ERO</b>	0,00	0,00	0,12	0,00
	<b>FTS</b>	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>HIO</b>	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>INL</b>	0,00	0,00	0,19	0,00
	<b>LOO</b>	0,00	0,04	0,00	0,00
	<b>NOI</b>	0,00	0,00	0,04	0,00
	<b>OHE</b>	0,08	0,00	0,00	0,00
	<b>OTH</b>	0,04	0,04	0,08	0,08
	<b>PDE</b>	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>SER</b>	0,41	0,12	0,00	0,04
	<b>STD</b>	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>STP</b>	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>UNK</b>	0,00	0,04	0,00	0,00
	<b>UST</b>	0,00	0,00	0,00	0,04
<b>VIB</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	
<b>TOTAL</b>	0,82	0,37	0,73	0,21	

<b>SOMATÓRIO</b>	<b>2,11 %</b>
------------------	---------------

Fonte: Adaptado de OREDA (2002).

Tabela C.4 - Porcentagem de falhas para Subsistema de Lubrificação

		SUBSISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO								
		Válvula de retenção*	Ventiladores	Filtros	Óleo	Tubulação*	Bomba com motor	Reservatório	Reservatório com sistema de aquecimento	Vedações*
<b>MODO DE FALHA</b>	<b>AIR</b>	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>BRD</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,03
	<b>ELP</b>	0,01	0,00	0,00	0,00	0,79	0,00	0,00	0,00	1,95
	<b>ELU</b>	0,00	0,29	0,25	0,21	0,82	0,41	0,00	0,08	2,39
	<b>ERO</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>FTS</b>	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00
	<b>HIO</b>	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>INL</b>	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,19
	<b>LOO</b>	0,00	0,00	0,00	0,76	0,20	0,00	0,00	0,00	0,01
	<b>NOI</b>	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,03
	<b>OHE</b>	0,00	0,21	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
	<b>OTH</b>	0,00	0,04	0,33	0,12	0,15	0,04	0,00	0,00	0,07
	<b>PDE</b>	0,00	0,04	0,17	0,04	0,23	0,08	0,00	0,00	0,03
	<b>SER</b>	0,00	0,12	0,54	0,45	0,17	0,04	0,04	0,04	0,10
	<b>STD</b>	0,00	0,12	0,08	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,19
	<b>STP</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>UNK</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>UST</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12
<b>VIB</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	
<b>TOTAL</b>	0,03	0,82	1,50	1,66	2,71	0,74	0,04	0,12	5,15	

<b>SOMATÓRIO</b>	<b>12,75 %</b>
------------------	----------------

Fonte: Adaptado de OREDA (2002).

Tabela C.5 - Porcentagem de falhas para Subsistema de Controle e Monitoramento

		SUBSISTEMA DE CONTROLE E MONITORAMENTO													
		Atuador	Caixas de cabeamento e junção	Válvula de retenção*	Unidade de controle	Sensor de fluxo	Sensor geral	Sensor de nível	Sensor de pressão	Sensor de velocidade	Sensor de temperatura	Sensor de vibração	Fonte de alimentação interna	Monitoração	Válvulas
MODO DE FALHA	AIR	0,41	0,56	0,00	0,95	6,60	1,03	0,33	4,40	0,37	3,65	1,94	0,12	0,89	0,04
	BRD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ELP	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,31
	ELU	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	1,57
	ERO	0,04	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,04	0,00	0,00	0,12	0,37
	FTS	0,00	0,00	0,00	0,21	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,04
	HIO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	INL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,53
	LOO	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17
	NOI	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23
	OHE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
	OTH	0,25	0,04	0,00	0,12	0,04	0,21	0,00	0,08	0,12	0,00	0,00	0,00	0,04	1,03
	PDE	0,00	0,17	0,00	0,25	0,62	0,08	0,04	0,37	0,00	0,29	0,45	0,00	0,08	0,50
	SER	0,50	0,21	0,00	0,21	0,17	0,45	0,17	0,50	0,00	0,56	0,45	0,04	0,14	1,32
	STD	0,00	0,00	0,00	0,12	0,04	0,00	0,04	0,12	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,17
	STP	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	UNK	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00
	UST	0,08	0,08	0,00	0,29	0,12	0,17	0,04	0,50	0,00	0,54	0,33	0,08	0,12	0,10
	VIB	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,39	0,00	0,00	0,00
TOTAL	1,29	1,07	0,03	2,64	7,74	2,20	0,63	6,41	0,49	5,18	3,65	0,25	1,40	9,39	

<b>SOMATÓRIO</b>	<b>42,31 %</b>
------------------	----------------

Fonte: Adaptado de OREDA (2002).

Tabela C.6 - Porcentagem de falhas para Subsistema Bomba

		SUBSISTEMA BOMBA											
		Carcaça	Válvula de retenção*	Camisa do cilindro	Diafragma	Rotor	Tubulação*	Pistão	Mancal radial	Vedações*	Eixo	Suporte	Mancal axial*
<b>MODO DE FALHA</b>	<b>AIR</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00
	<b>BRD</b>	0,37	0,00	0,04	0,00	0,04	0,02	0,04	0,12	0,03	0,17	0,00	0,12
	<b>ELP</b>	0,47	0,01	0,01	0,00	0,00	0,79	0,72	0,04	1,95	0,00	0,00	0,00
	<b>ELU</b>	0,25	0,00	0,08	0,00	0,00	0,82	0,08	0,02	2,39	0,04	0,00	0,10
	<b>ERO</b>	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>FTS</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00
	<b>HIO</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>INL</b>	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,01	0,00	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00
	<b>LOO</b>	0,04	0,00	0,04	0,00	0,04	0,20	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	<b>NOI</b>	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,03	0,12	0,00	0,00
	<b>OHE</b>	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,04
	<b>OTH</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,08	0,07	0,00	0,00	0,00
	<b>PDE</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,12	0,03	0,00	0,00	0,00
	<b>SER</b>	0,04	0,00	0,00	0,04	0,00	0,17	0,00	0,08	0,10	0,00	0,00	0,04
	<b>STD</b>	0,27	0,00	0,00	0,00	0,06	0,33	0,00	0,31	0,19	0,04	0,12	0,19
	<b>STP</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>UNK</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>UST</b>	0,00	0,00	0,12	0,02	0,08	0,00	0,00	0,04	0,12	0,08	0,00	0,00
<b>VIB</b>	0,08	0,00	0,00	0,00	0,12	0,02	0,00	0,61	0,00	0,11	0,91	0,18	
<b>TOTAL</b>	1,56	0,03	0,31	0,15	0,35	2,71	0,84	1,61	5,15	0,68	1,03	0,67	

<b>SOMATÓRIO</b>	<b>15,07 %</b>
------------------	----------------

Fonte: Adaptado de OREDA (2002).

Tabela C.7 - Porcentagem de falhas para Subsistema Indefinido

		SUBSISTEMA INDEFINIDO		
		Outros	Subunidade	Desconhecido
<b>MODO DE FALHA</b>	<b>AIR</b>	0,04	0,12	1,40
	<b>BRD</b>	0,00	0,58	0,21
	<b>ELP</b>	0,04	0,10	0,99
	<b>ELU</b>	0,41	0,21	1,11
	<b>ERO</b>	0,00	0,00	0,21
	<b>FTS</b>	0,04	0,33	0,87
	<b>HIO</b>	0,00	0,00	0,13
	<b>INL</b>	0,14	0,08	0,21
	<b>LOO</b>	0,21	0,54	1,11
	<b>NOI</b>	0,08	0,04	0,37
	<b>OHE</b>	0,04	0,00	0,08
	<b>OTH</b>	0,08	0,50	1,20
	<b>PDE</b>	0,50	0,25	0,29
	<b>SER</b>	0,58	0,37	1,73
	<b>STD</b>	0,12	0,45	0,62
	<b>STP</b>	0,00	0,00	0,00
	<b>UNK</b>	0,12	0,00	0,45
	<b>UST</b>	0,00	0,37	1,53
	<b>VIB</b>	0,04	0,41	0,58
<b>TOTAL</b>	2,46	4,37	13,11	

<b>SOMATÓRIO</b>	<b>19,90 %</b>
------------------	----------------

Fonte: Adaptado de OREDA (2002).

No somatório geral das porcentagens, alguns itens como: vedação, tubulação e válvulas de retenção, aos quais pertencem a mais de um subsistema, foi dividido igualmente a porcentagem para cada um dos subsistemas.

## APÊNDICE D – MODELAGEM MULTIESTADO PARA O SISTEMA DE BOMBEAMENTO

Este apêndice é um sumário de uma abordagem multiestado para o Sistema de Bombeamento considerada no Capítulo 5. Para realizar a modelagem serão assumidas algumas considerações:

- O sistema é considerado como não-reparável e não possui manutenção;
- O sistema possui quatro estados: operacional, indicativo, degradado e crítico;
- O estado operacional é considerado como partida, e representa o total funcionamento do sistema;
- O estado indicativo não representa uma falha, mas representa um evento onde é perceptível alguma alteração (efeitos) que levam a um processo de falha;
- O estado degradado representa um estado de falha no qual o sistema não deixa de cumprir a função global, mas já existe uma perda de desempenho do sistema;
- O estado crítico representa o estado de falha no qual o sistema deixa de cumprir a função global do sistema;
- Os estados são considerados independentes e o sistema somente pode estar em um dos estados a cada tempo;
- As taxas de transição entre os estados são consideradas constantes.

Resolveu-se usar Cadeias de Markov, uma vez que podem ser construídos inicialmente com modelos simples e posteriormente expandidos para modelos mais complexos. A Figura D.1 mostra a Cadeia de Markov desenvolvida.

Apesar desta modelagem considerar apenas um estado degradado, este modelo pode ser aplicado para obter *insights* significativos, como demonstrado no Capítulo 5.

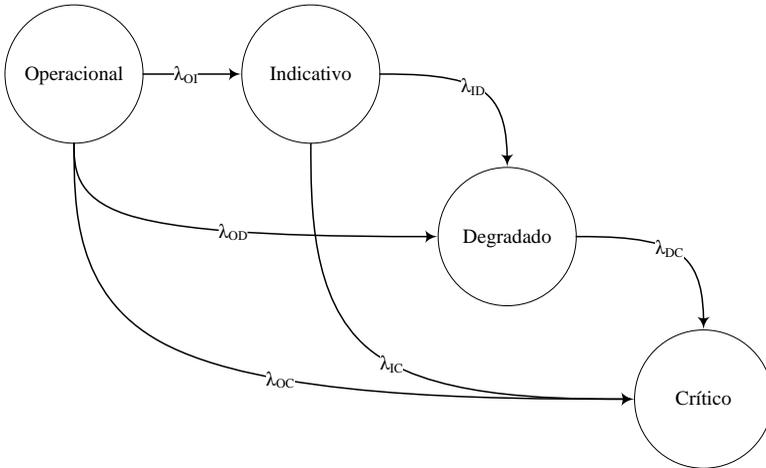
No caso do OREDA (2002), na contagem das falhas (degradadas ou críticas) não é indicado o estado do item (degradado ou operacional) anterior ao evento de falha contabilizada. Portanto, o cálculo da taxa de falha crítica envolve todos os caminhos possíveis para tal falha, passando de: operacional para crítica; operacional para indicativo<sup>8</sup> e depois para

---

<sup>8</sup> O estado indicativo corresponde ao evento que no OREDA (2002) foi utilizado para se estimar a taxa de falha incipiente.

crítica; e de operacional para degradado e depois para crítico; e, por fim, operacional para indicativo depois para degradado e por último para crítico.

Figura D.1 - Cadeia de Markov para o Sistema de Bombeamento



Fonte: O autor.

Assim, temos:

$$\lambda_I = \lambda_{OI} \quad (D.1)$$

$$\lambda_D = \lambda_{OD} + \lambda_{ID} \quad (D.2)$$

$$\lambda_C = \lambda_{OC} + \lambda_{IC} + \lambda_{DC} \quad (D.3)$$

Onde:

$\lambda_C$ : Taxa de falha crítica do OREDA

$\lambda_D$ : Taxa de falha degradada do OREDA

$\lambda_I$ : Taxa de falha incipiente do OREDA

$\lambda_{OI}$ : Taxa de transição do estado operacional ao estado indicativo

$\lambda_{OD}$ : Taxa de transição do estado operacional ao estado degradado

$\lambda_{OC}$ : Taxa de transição do estado operacional ao estado crítico

$\lambda_{IC}$ : Taxa de transição do estado indicativo ao estado crítico

$\lambda_{ID}$ : Taxa de transição do estado indicativo ao estado degradado

$\lambda_{DC}$ : Taxa de transição do estado degradado ao estado crítico

Em uma primeira forma de aproximação seria dividir igualmente a taxa obtida pelo OREDA (2002). No entanto, poderia estar superestimando ou subestimando algum dos caminhos propostos. Para resolver tal problema, utilizou-se uma ponderação a partir das próprias taxas de falhas apresentadas. Assim sendo, têm-se:

$$\lambda_{OD} = A \cdot \lambda_D \quad (\text{D.4})$$

$$\lambda_{ID} = B \cdot \lambda_D \quad (\text{D.5})$$

$$\lambda_{OC} = C \cdot \lambda_C \quad (\text{D.6})$$

$$\lambda_{DC} = D \cdot \lambda_C \quad (\text{D.7})$$

$$\lambda_{IC} = E \cdot \lambda_C \quad (\text{D.8})$$

$$\lambda_{OI} = F \cdot \lambda_I \quad (\text{D.9})$$

Onde:

$$A = \frac{\lambda_D}{\lambda_D + \lambda_I} \quad (\text{D.10})$$

$$B = \frac{\lambda_I}{\lambda_D + \lambda_I} \quad (\text{D.11})$$

$$C = \frac{\lambda_C}{\lambda_C + \lambda_D + \lambda_I} \quad (\text{D.12})$$

$$D = \frac{\lambda_D}{\lambda_C + \lambda_D + \lambda_I} \quad (\text{D.13})$$

$$E = \frac{\lambda_I}{\lambda_C + \lambda_D + \lambda_I} \quad (\text{D.14})$$

$$F = 1 \quad (\text{D.15})$$

Observe que o valor de  $F$  é igual a 1, uma vez que não existe outro caminho que leve o sistema a sair do estado operacional para um estado indicativo.

Dado que:  $P_O(t)$  seja a probabilidade do sistema estar no estado operacional;  $P_I(t)$  seja a probabilidade do sistema estar no estado indicativo;  $P_D(t)$  seja a probabilidade do sistema estar no estado degradado e  $P_C(t)$  seja a probabilidade do sistema estar no estado crítico.

Para um intervalo de tempo  $\Delta t$  após o sistema entrar em funcionamento, tem-se:

$$P_o(t + \Delta t) = P_o(t) \cdot [1 - (\lambda_{OI} + \lambda_{OD} + \lambda_{OC}) \cdot \Delta t] \quad (D.16)$$

$$P_I(t + \Delta t) = P_o(t) \cdot \lambda_{OI} \cdot \Delta t + P_I(t) \cdot [1 - (\lambda_{ID} + \lambda_{IC}) \cdot \Delta t] \quad (D.17)$$

$$P_D(t + \Delta t) = P_o(t) \cdot \lambda_{OD} \cdot \Delta t + P_I(t) \cdot \lambda_{ID} \cdot \Delta t + P_D(t) \cdot (1 - \lambda_{DC} \cdot \Delta t) \quad (D.18)$$

$$P_C(t + \Delta t) = P_o(t) \cdot \lambda_{OC} \cdot \Delta t + P_I(t) \cdot \lambda_{IC} \cdot \Delta t + P_D(t) \cdot \lambda_{DC} \cdot \Delta t \quad (D.19)$$

$$P_o(t + \Delta t) = P_o(t) \cdot [1 - (\lambda_{OI} + \lambda_{OD} + \lambda_{OC}) \cdot \Delta t] \quad (D.20)$$

Rearranjando as equações, tem-se:

$$\frac{P_o(t + \Delta t) - P_o(t)}{\Delta t} = -(\lambda_{OI} + \lambda_{OD} + \lambda_{OC}) \cdot P_o(t) \quad (D.21)$$

$$\frac{P_I(t + \Delta t) - P_I(t)}{\Delta t} = \lambda_{OI} \cdot P_o(t) - (\lambda_{ID} + \lambda_{IC}) \cdot P_I(t) \quad (D.22)$$

$$\frac{P_D(t + \Delta t) - P_D(t)}{\Delta t} = \lambda_{OD} \cdot P_o(t) + \lambda_{ID} \cdot P_I(t) - \lambda_{DC} \cdot P_D(t) \quad (D.23)$$

$$\frac{P_C(t + \Delta t) - P_C(t)}{\Delta t} = \lambda_{OC} \cdot P_o(t) + \lambda_{IC} \cdot P_I(t) + \lambda_{DC} \cdot P_D(t) \quad (D.24)$$

Fazendo  $\Delta t$  tender a zero e colocando em forma matricial, tem-se:

$$\begin{pmatrix} \frac{dP_o(t)}{dt} \\ \frac{dP_I(t)}{dt} \\ \frac{dP_D(t)}{dt} \\ \frac{dP_C(t)}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(\lambda_{OI} + \lambda_{OD} + \lambda_{OC}) & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{OI} & -(\lambda_{ID} + \lambda_{IC}) & 0 & 0 \\ \lambda_{OD} & \lambda_{ID} & -\lambda_{DC} & 0 \\ \lambda_{OC} & \lambda_{IC} & \lambda_{DC} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_o(t) \\ P_I(t) \\ P_D(t) \\ P_C(t) \end{pmatrix} \quad (D.25)$$

As taxas de falhas utilizados foram extraídas do OREDA (2002, p. 173-175) e foram considerados a média dos valores apresentados. Esses valores estão apresentados na Tabela D.1

Tabela D.1 - Taxas de falhas para cada subsistema

Subsistemas	Taxa de falha ( $\lambda$ ) (x $10^{-6}$ horas)		
	Crítica	Degradada	Total
Controle e monitoramento	31,04	85,03	116,7
Indefinido	14,57	39,91	54,57
Bomba	11,03	30,22	41,25
Lubrificação	9,34	25,58	34,92
Transmissão	5,70	15,61	21,31
Miscelânea	1,54	4,23	5,75

Fonte: Adaptado do OREDA (2002).

A partir destas taxas pode-se calcular as constantes de ponderação através das Equações D.10 a D.15. A Tabela D.2 mostra os valores das mesmas.

Tabela D.2 - Valores das constantes de ponderação

Constantes					
A	B	C	D	E	F
0,234051	0,765949	0,078717	0,215627	0,705656	1

Fonte: O autor.

Pode-se então substituir as constantes e as taxas de falhas nas Equações D.4 a D.9 para se obter as taxas de transição entre os estados na cadeia. A Tabela D.3 mostra as taxas de transição para cada um dos subsistemas.

Tabela D.3 - Taxas de transição para cada subsistema

Subsistemas	Taxa de falha ( $\lambda$ ) (x $10^{-6}$ horas)					
	$\lambda_{oi}$	$\lambda_{od}$	$\lambda_{oc}$	$\lambda_{id}$	$\lambda_{ic}$	$\lambda_{dc}$
Controle e monitoramento	278,25	19,90	2,44	65,12	21,90	6,69
Indefinido	130,59	9,34	1,15	30,57	10,28	3,14
Bomba	98,89	7,07	0,87	23,15	7,78	2,38
Lubrificação	83,70	5,99	0,74	19,59	6,59	2,01

Fonte: O autor.

Tabela D.3 - Taxas de transição para cada subsistema (continuação)

Subsistemas	Taxa de falha ( $\lambda$ ) (x 10-6 horas)					
	$\lambda_{oi}$	$\lambda_{od}$	$\lambda_{oc}$	$\lambda_{id}$	$\lambda_{ic}$	$\lambda_{dc}$
Transmissão	51,09	3,65	0,45	11,96	4,02	1,23
Miscelânea	13,85	0,99	0,12	3,24	1,09	0,33

Fonte: O autor.

Substituindo os valores das taxas de transição (Tabela D.3) na Equação D.25, obtém-se:

- Para o Subsistema de Controle e Monitoramento:

$$P_o(t) = e^{-0,0003006.t} \quad (D.26)$$

$$P_I(t) = -1,007.e^{-0,0003006.t} + 1,007.e^{-0,00002435.t} \quad (D.27)$$

$$P_D(t) = 0,007355.e^{-0,0003006.t} - 1,250.e^{-0,00002435.t} + 1,242.e^{-0,000006693.t} \quad (D.28)$$

$$P_C(t) = -0,000148.e^{-0,0003006.t} + 0,2425.e^{-0,00002435.t} - 1,242.e^{-0,000006693.t} + 1 \quad (D.29)$$

- Para o Subsistema Indefinido:

$$P_o(t) = e^{-0,0001411.t} \quad (D.30)$$

$$P_I(t) = -1,303.e^{-0,0001411.t} + 1,303.e^{-0,00004085.t} \quad (D.31)$$

$$P_D(t) = 0,2210.e^{-0,0003006.t} - 1,056.e^{-0,00002435.t} + 0,8352.e^{-0,000003141.t} \quad (D.32)$$

$$P_C(t) = 0,08189.e^{-0,0001411.t} - 0,2467.e^{-0,00002435.t} - 0,8352.e^{-0,000003141.t} + 1 \quad (D.33)$$

- Para o Subsistema Bomba:

$$P_o(t) = e^{-0,0001068.t} \quad (D.34)$$

$$P_I(t) = -1,303.e^{-0,0001068.t} + 1,303.e^{-0,000030393.t} \quad (D.35)$$

$$P_D(t) = 0,2210.e^{-0,0001068.t} - 1,056.e^{-0,000030393.t} + 0,8352.e^{-0,000002379.t} \quad (D.36)$$

$$P_C(t) = 0,08189.e^{-0,0001068.t} - 0,2467.e^{-0,000030393.t} - 0,8352.e^{-0,000002379.t} + 1 \quad (D.37)$$

- Para o Subsistema de Lubrificação:

$$P_o(t) = e^{-0,00009043.t} \quad (D.38)$$

$$P_I(t) = -1,303.e^{-0,00009043.t} + 1,303.e^{-0,00002618.t} \quad (D.39)$$

$$P_D(t) = 0,2210.e^{-0,00009043.t} - 1,056.e^{-0,00002618.t} + 0,8352.e^{-0,00002013.t} \quad (D.40)$$

$$P_C(t) = 0,08189.e^{-0,00009043.t} - 0,2467.e^{-0,00002618.t} - 0,8352.e^{-0,00002013.t} + 1 \quad (D.41)$$

- Para o Subsistema de Transmissão:

$$P_o(t) = e^{-0,00005520.t} \quad (D.42)$$

$$P_I(t) = -1,303.e^{-0,00005520.t} + 1,303.e^{-0,00001598.t} \quad (D.43)$$

$$P_D(t) = 0,2210.e^{-0,00005520.t} - 1,056.e^{-0,00001598.t} + 0,8352.e^{-0,000001229.t} \quad (D.44)$$

$$P_C(t) = 0,08189.e^{-0,00005520.t} - 0,2467.e^{-0,00001598.t} - 0,8352.e^{-0,000001229.t} + 1 \quad (D.45)$$

- Para o Subsistema Miscelânea:

$$P_o(t) = e^{-0,00001496.t} \quad (D.46)$$

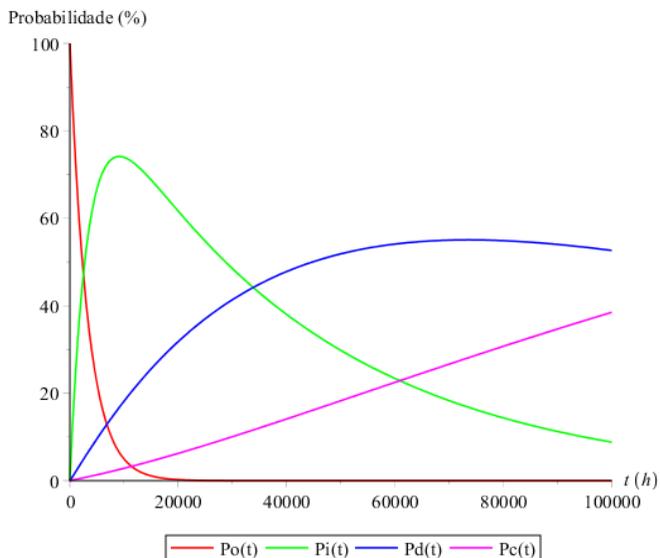
$$P_I(t) = -1,303.e^{-0,00001496.t} + 1,303.e^{-0,000004331.t} \quad (D.47)$$

$$P_D(t) = 0,2210.e^{-0,00001496.t} - 1,056.e^{-0,000004331.t} + 0,8352.e^{-0,0000003331.t} \quad (D.48)$$

$$P_C(t) = 0,08189.e^{-0,00001496.t} - 0,2467.e^{-0,000004331.t} - 0,8352.e^{-0,0000003331.t} + 1 \quad (D.49)$$

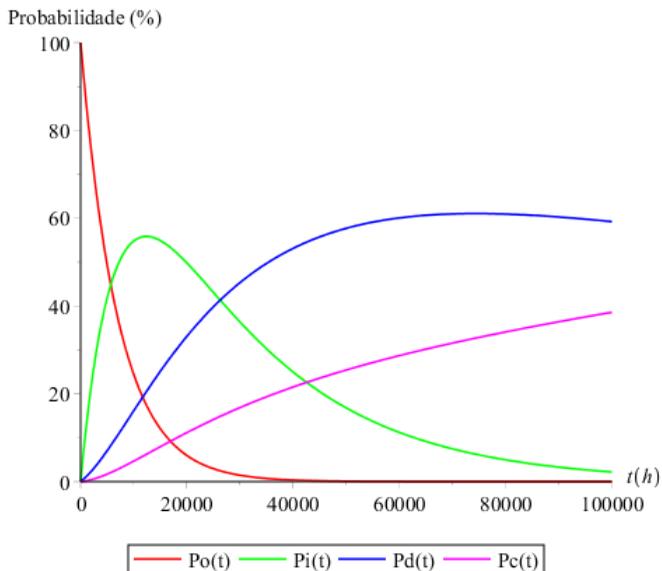
A partir das Equações D.26 a D.49, pode-se representar graficamente. As Figuras D.2 a D.7 mostram graficamente as equações encontradas para cada um dos estados (operacional, indicativo, degradado e crítico) de cada um dos subsistemas.

Figura D.2 – Curva de probabilidade para cada estado do Subsistema de Controle e Monitoramento



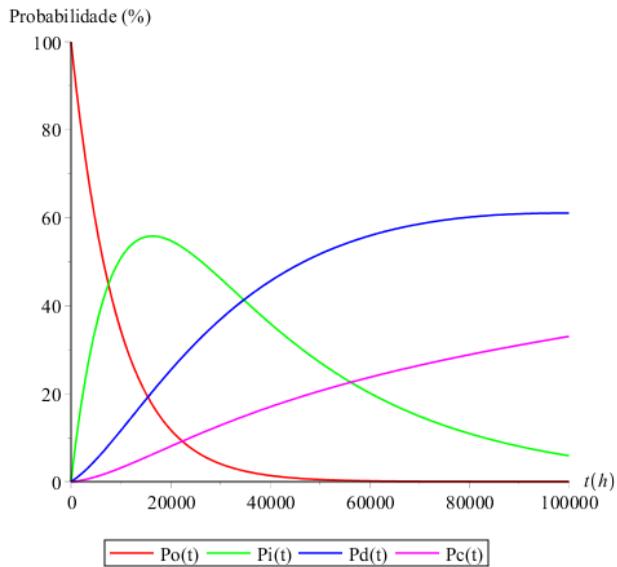
Fonte: O autor.

Figura D.3 – Curva de probabilidade para cada estado do Subsistema Indefinido



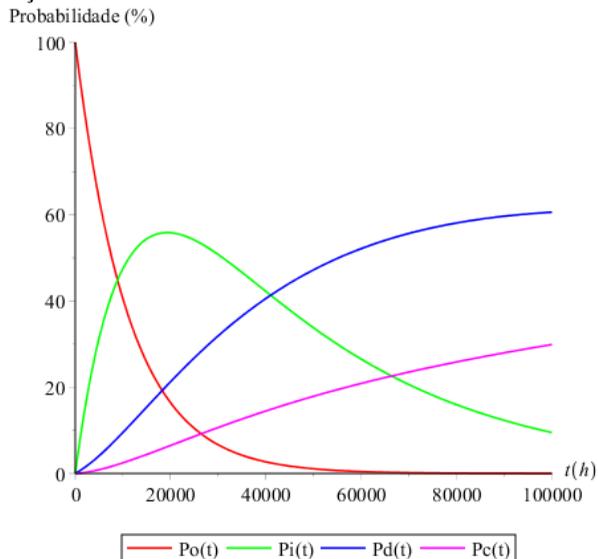
Fonte: O autor.

Figura D.4 – Curva de probabilidade para cada estado do Subsistema Bomba



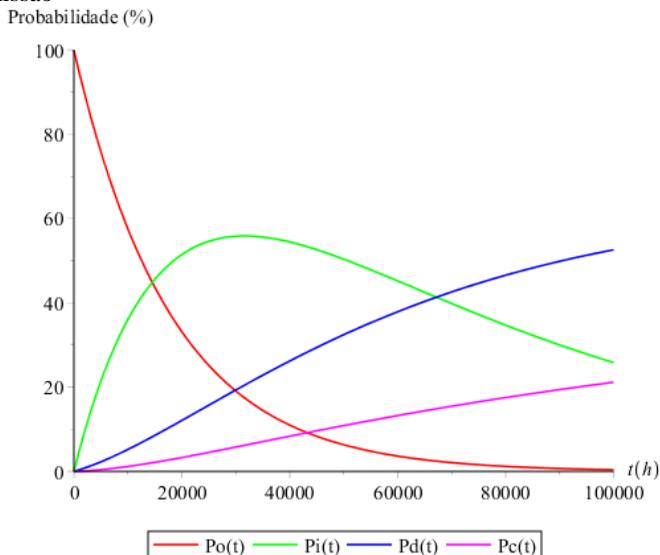
Fonte: O autor.

Figura D.5 – Curva de probabilidade para cada estado do Subsistema de Lubrificação



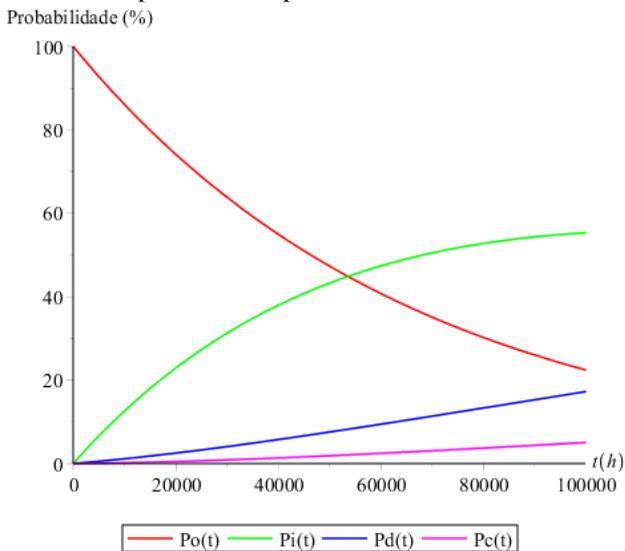
Fonte: O autor.

Figura D.6 – Curva de probabilidade para cada estado do Subsistema de Transmissão



Fonte: O autor.

Figura D.7 – Curva de probabilidade para cada estado do Subsistema Miscelânea



Fonte: O autor.

## APÊNDICE E – QUESTIONÁRIO



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DE PRODUTOS



### QUESTIONÁRIO – SISTEMATIZAÇÃO PARA ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO DE SISTEMAS TÉCNICOS (SisAD)

1. Os objetivos da sistemática proposta estão claros?  
( ) Totalmente                      ( ) Parcialmente                      ( ) Não
  
2. A estrutura da sistemática é de fácil entendimento?  
( ) Totalmente                      ( ) Parcialmente                      ( ) Não
  
3. A sistemática proposta apresenta o nível de detalhamento requerido para sua aplicação?  
( ) Totalmente                      ( ) Parcialmente                      ( ) Não
  
4. A sistemática proposta permite orientar a análise dos processos de degradação dos sistemas técnicos?  
( ) Totalmente                      ( ) Parcialmente                      ( ) Não
  
5. O *software* está coerente com a sistemática proposta?  
( ) Totalmente                      ( ) Parcialmente                      ( ) Não
  
6. As informações do *software* podem atuar como um facilitador na aplicação da sistemática?  
( ) Totalmente                      ( ) Parcialmente                      ( ) Não
  
7. Aponte algumas sugestões e/ou críticas para a SisAD?