

Análise e Modelagem dos Processos de Degradação de Sistemas Técnicos

Rafael Monteiro Veras, Acires Dias
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

RESUMO:

Um sistema técnico degrada-se com o passar do tempo e, como resultado apresenta desvios de desempenho para qual foi projetado. Percebe-se que estes desvios ou falhas, nem sempre acontecem de maneira abrupta, e sim apresentam vários estados que podem produzir efeitos no sistema, tais como: aumento de vibração, temperatura, ruído, folgas e interrupção da função, entre outros. Estes efeitos trazem informações sobre estes processos de degradação e podem ser utilizados como referenciais para tomadas de decisão para questões operacionais e de manutenção. Dentro deste contexto, este trabalho aborda a aplicação de uma sistemática para análise de degradação (SisAD) que visa organizar, analisar e caracterizar o processo de degradação em sistemas técnicos por meio de técnicas, tais como o: FMEA, FTA e Cadeias de Markov. Esta aplicação foi realizada em um sistema de bombeamento e utilizou as informações contidas no OREDA (*Offshore Reliability Data Handbook*). Com os resultados obtidos (cenários de falhas, periodicidade de manutenção, principais mecanismos e causas de degradação do sistema), foi possível constatar que a abordagem desenvolvida viabiliza a caracterização do processo de degradação de sistemas técnicos e auxilia as ações de manutenibilidade, principalmente em nível do planejamento das manutenções preventivas e preditivas.

Palavras-chave: Processos de Degradação, Sistemática, Manutenibilidade, Técnicas de Análise de Falha.

1. INTRODUÇÃO

A partir dos anos 1960, ocorreu um aumento de estudos de problemas relacionados, principalmente, ao desgaste, atrito e lubrificação de sistemas mecânicos [36]. E segundo [27] 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.

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 [23, 36].

Tradicionalmente, os sistemas são tratados apenas como dois estados: um estado bom ou operacional e outro em falha. No entanto, vale ressaltar que, por muitas vezes, existem nos sistemas uma sequência de estados (estados intermediários) entre o estado operacional e estado de falha [5, 17, 25, 35].

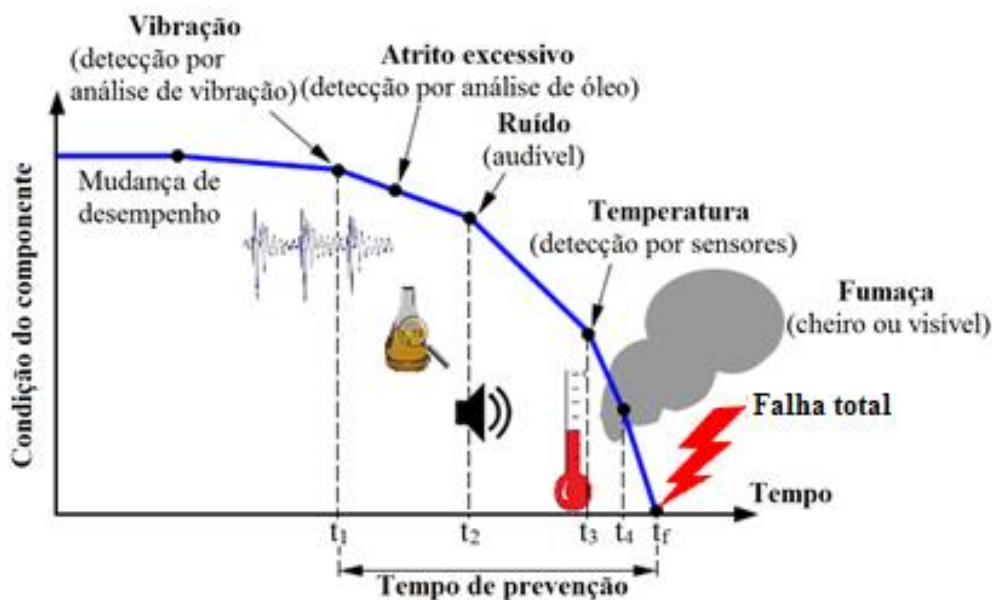
Para analisar essa progressão entre o estado operacional e de falha, as referências sugerem uma abordagem multiestados [5, 17, 35]. Nessa abordagem, é introduzido o conceito de estados degradados, que são estados intermediários que levam a falha total do sistema. De acordo com [5], por meio desses estados consegue-se promover uma maior compreensão e resolução dentro da fase de degradação de um item ou sistema.

Em razão dos estados degradados, 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.

Um sistema no estado degradado ainda pode, mesmo que parcialmente, ser capaz de executar sua função, como mostrado na Figura 2. Deve ser ressaltado que, dependendo do nível da perda, da criticidade e da disponibilidade do sistema, esta falha pode suscitar efeitos catastróficos.

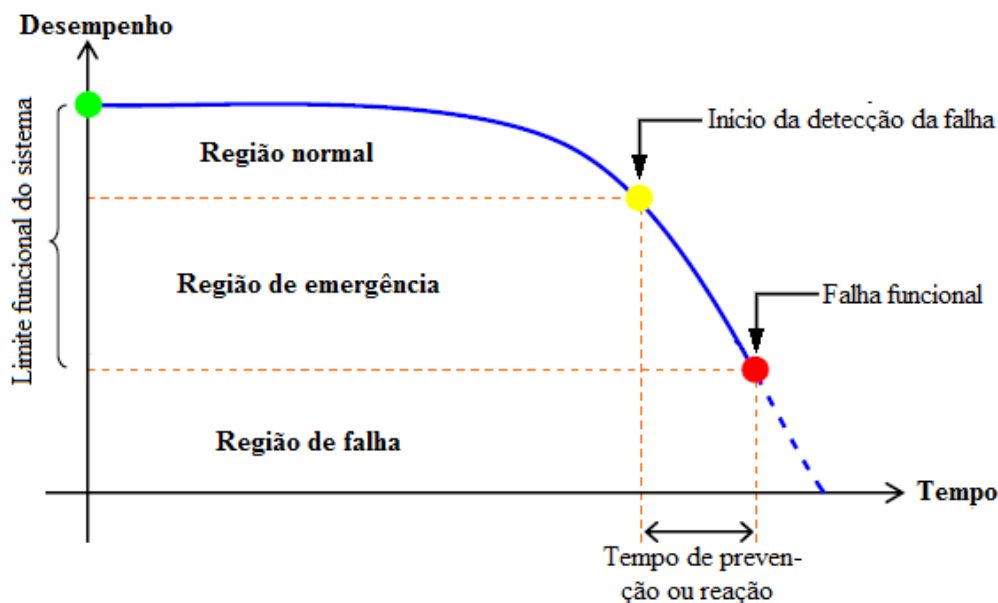
Pela monitoração de certos parâmetros e/ou variáveis de estado, como mostrado na Figura 1, os níveis de falha de um sistema podem ser observados, podendo evitar situações de falhas totais ou de perda de desempenho [3]. Desta forma, a predição das falhas de equipamentos reduz os custos associados ao tempo inoperante.

Figura 1 - Exemplo de degradação de um sistema mecânico



Fonte: Adaptado de [30].

Figura 2 - Representação do desempenho em função das regiões de operação do sistema



Fonte: Adaptado de [25].

Neste contexto, ações devem ser tomadas para evitar ou minimizar os problemas ocasionados pela degradação. Dessa maneira, este artigo apresenta uma aplicação de uma sistemática (SisAD – Sistemática para Análise de Degradação de Sistemas Técnicos) em busca da caracterização do processo de falhas por degradação em sistemas técnicos.

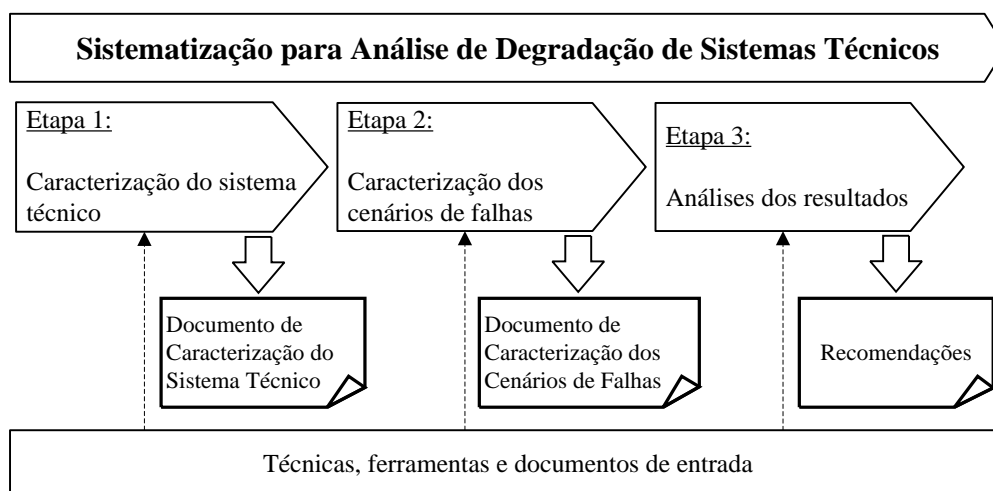
Nas próximas sessões será apresentado um breve resumo da SisAD para auxiliar no entendimento da aplicação. Em seguida, será tratado da aplicação da sistemática realizada em um sistema de bombeamento, por meio das informações obtidas a partir do OREDA (*Offshore Reliability*

Data Handbook). Logo após, serão mostrados os resultados obtidos e, por fim, as conclusões do presente trabalho.

2. SISTEMÁTICA SISAD

A SisAD é uma sistemática que visa o estudo de sistemas técnicos por meio da análise de falhas de seus itens, quais sejam, subsistema e componentes, no que tange os processos de degradação nestes sistemas técnicos [32]. Para tanto, a SisAD se divide em três etapas básicas: caracterização do sistema técnico; caracterização dos cenários de falhas; e a análise dos resultados, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Etapas da SisAD



Fonte: Adaptado de [32].

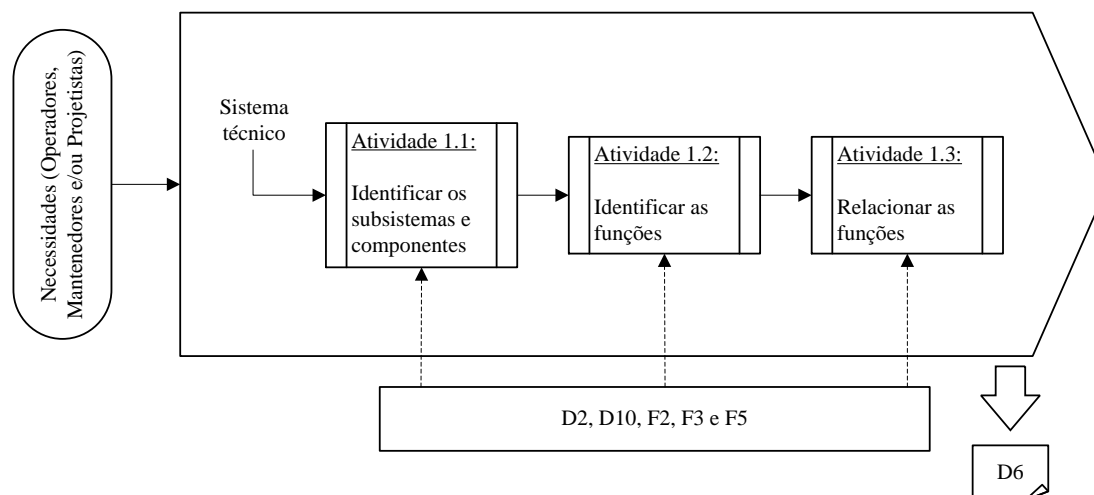
A primeira etapa da SisAD compreende a identificação dos subsistemas e componentes do sistema técnico a ser analisado. Já na segunda etapa, buscam-se as informações que permita priorizar, por meio do cálculo de taxas de falhas e confiabilidade, os subsistemas ou itens de maior relevância em termos das funções desempenhadas e dos processos de degradação.

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

Vale ressaltar que, em cada uma dessas etapas existem atividades que se baseiam em técnicas, documentos e ferramentas para colher as informações necessárias para o cumprimento da etapa. Por exemplo, a Figura 4 mostra as atividades propostas na Etapa 1.

Pode ser visto, que essa etapa é composta por 3 atividades básicas. A fim de obter as informações, esta etapa utiliza manuais de fabricantes (D2), relatórios de Teardown (D10), conhecimentos de especialistas e sistemas similares. E a partir o uso de técnicas como: brainstorming (F2), técnicas de análise funcional (F3) e reuniões de equipes (F5) auxiliam na elucidação do conhecimento já interiorizado do sistema técnico. Por fim, essas informações são sumarizadas no Documento de Caracterização do Sistema Técnico (D6), que serve de entrada para a etapa seguinte.

Figura 4 - Etapa 1: Caracterização do sistema técnico



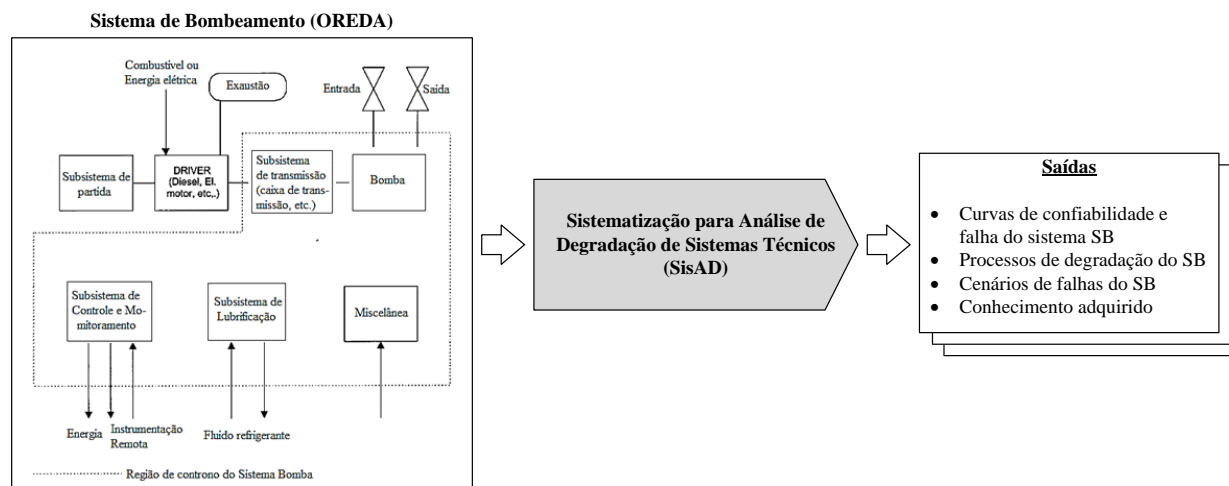
Fonte: Adaptado de [32].

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.

3. APLICAÇÃO DA SISAD

A Figura 5 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 de combate a incêndio.

Figura 5 - Interação do Sistema de Bombeamento com a SisAD



Fonte: O autor.

3.1 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA TÉCNICO

A partir das informações presentes no [19], pode-se identificar os subsistemas e a função estabelecida para cada um desses subsistemas. O Quadro 1 mostra os subsistemas e a função para cada um. Vale ressaltar que, no *handbook*, são apresentados todos os componentes de cada um desses subsistemas; por exemplo, o subsistema miscelânea é composto por: filtros, ciclones, amortecedores de vibração, purgadores de ar, sistemas de resfriamento/aquecimento.

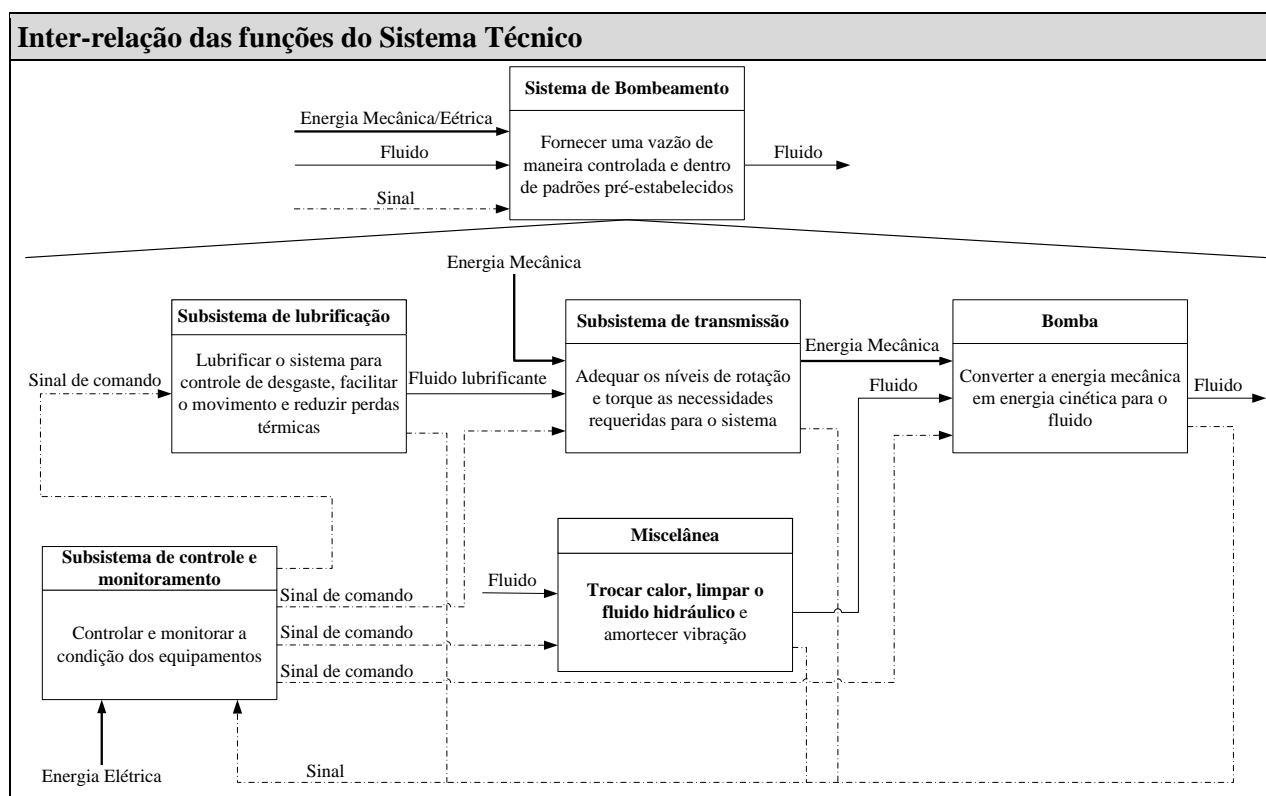
Quadro 1 - Desdobramento do SB em subsistemas e suas funções

Desdobramento das funções do Sistema Técnico	
Sistema de Bombeamento:	Fornecer uma vazão de maneira controlada e dentro de padrões pré-estabelecidos.
Bomba:	Converter a 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.

Fonte: O autor.

A partir do Quadro 1, pode-se então relacionar os subsistemas em função dos fluxos de sinal, material e energia. Este relacionamento pode ser observado no Quadro 2. Note que os subsistemas estão representados como caixas pretas, pois a intenção nessa representação funcional é compreender como o sistema está operando de modo global e não especificamente de cada um dos seus componentes.

Quadro 2 - Inter-relacionamento dos subsistemas



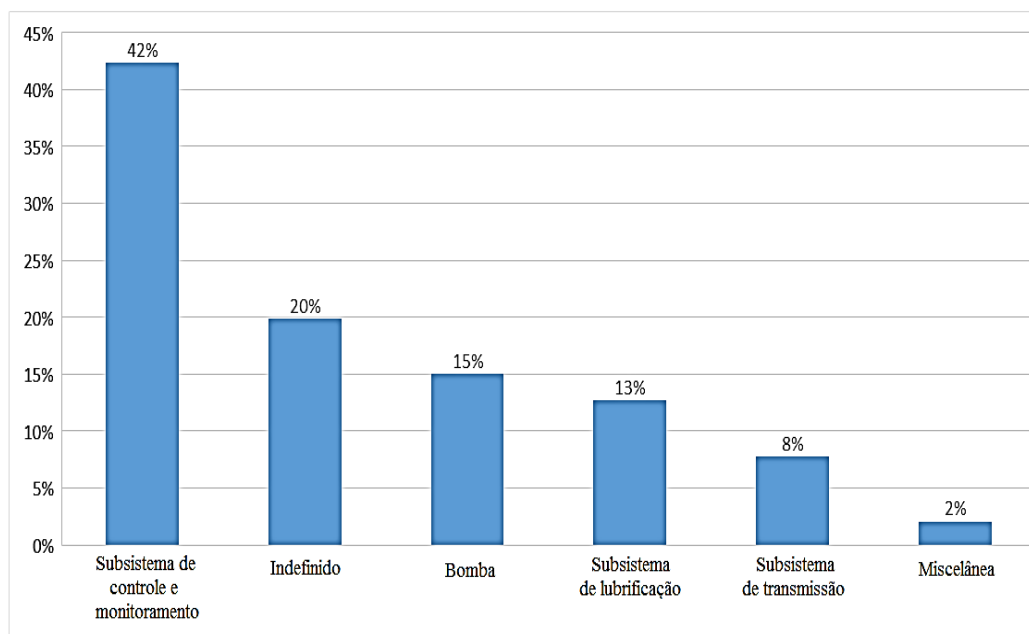
Fonte: O autor.

3.2 ETAPA 2: CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS DE FALHAS

Com o conhecimento gerado a partir da Etapa 1, pode-se então dar sequência à aplicação da sistemática SisAD. As duas primeiras atividades consistem na coleta e tratamento dos dados sistema. Para tanto, utilizou-se os dados apresentados no próprio OREDA.

Com base nessas informações e nos resultados da Etapa 1, foi possível calcular as porcentagens de falhas para cada um dos subsistemas. No entanto, 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, foram atribuídos a um outro subsistema denominado de indefinido. A Figura 6 mostra as porcentagens de falhas para cada um dos subsistemas.

Figura 6 - Porcentagem de falhas por subsistema



Fonte: O autor

Essencialmente, o OREDA separa as falhas em quatro tipos: crítica, degradada, incipiente e desconhecida (ver Quadro 3) e utiliza dessas definições para calcular as taxas de falhas dos componentes. Assim, cruzando as informações foi possível identificar para cada subsistema uma taxa de falha correspondente. Essas taxas podem ser visualizadas na Tabela 1.

Quadro 3 - Definição dos tipos de falhas para o OREDA (2002)

Tipos de falhas	Definição
Crítica	Falha que causa perda imediata e total da função do sistema.
Degradada	Falha que causa perda parcial da função e pode se transformar numa crítica.
Incipiente	Falha que não causa uma perda de função, mas pode vir a se transformar numa degradada ou crítica.
Desconhecida	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 de [19].

Perceba que na Tabela 1 não são apresentadas informações para a taxa incipiente. Isso deve-se pelo entendimento que esse evento não corresponde a uma falha, 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). Por isso, deve ser desconsiderada para o cálculo das curvas de probabilidade de falha e para a atividade de priorização que são proposta na SisAD.

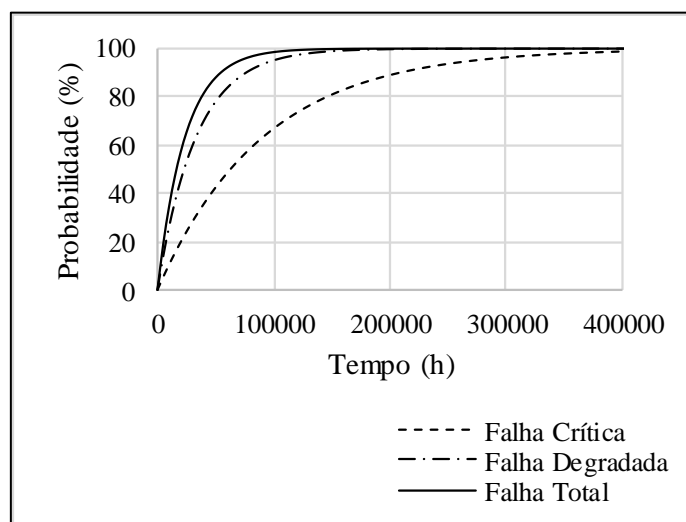
Tabela 1 - Taxa de falha para cada subsistema

Subsistemas	Taxa de falha (λ) ($\times 10^{-6}$ 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 [19].

Utilizando as taxas de falhas expostas acima e assumindo como referência uma distribuição do tipo exponencial pode-se, então, calcular as curvas de probabilidade de falha para cada subsistema. A Figura 7 mostra a curva de probabilidade de falha para o subsistema bomba.

Figura 7 - Curva Probabilidade de falha do Subsistema Bomba



Fonte: O autor.

A priorização dos subsistemas para análise das falhas e a caracterização dos cenários de falhas é feita baseando-se nos subsistemas que possuem as maiores taxas de falhas por degradação. No entanto, a análise focar-se-á nos sistemas hidráulicos (subsistemas de lubrificação e o subsistema bomba). Estes subsistemas não apresentaram as maiores probabilidades acumuladas de falha por degradação, contudo esses subsistemas representam o total de 28 % das falhas encontradas no sistema (ver Figura 6).

De acordo com a SisAD, após a priorização dos subsistemas é necessário identificar os modos de falhas, suas causa e efeitos e representar os cenários de falhas. Dessa forma, pode-se se aplicar um FMEA, para identificar os modos, causas e efeitos e, posteriormente, aplicar um FTA para representar os cenários de falhas de cada subsistema. Assim, o Quadro 4 mostra o FMEA e as Figura 8 e Figura 9 mostram o FTA desenvolvidos para o subsistema de lubrificação e o subsistema bomba.

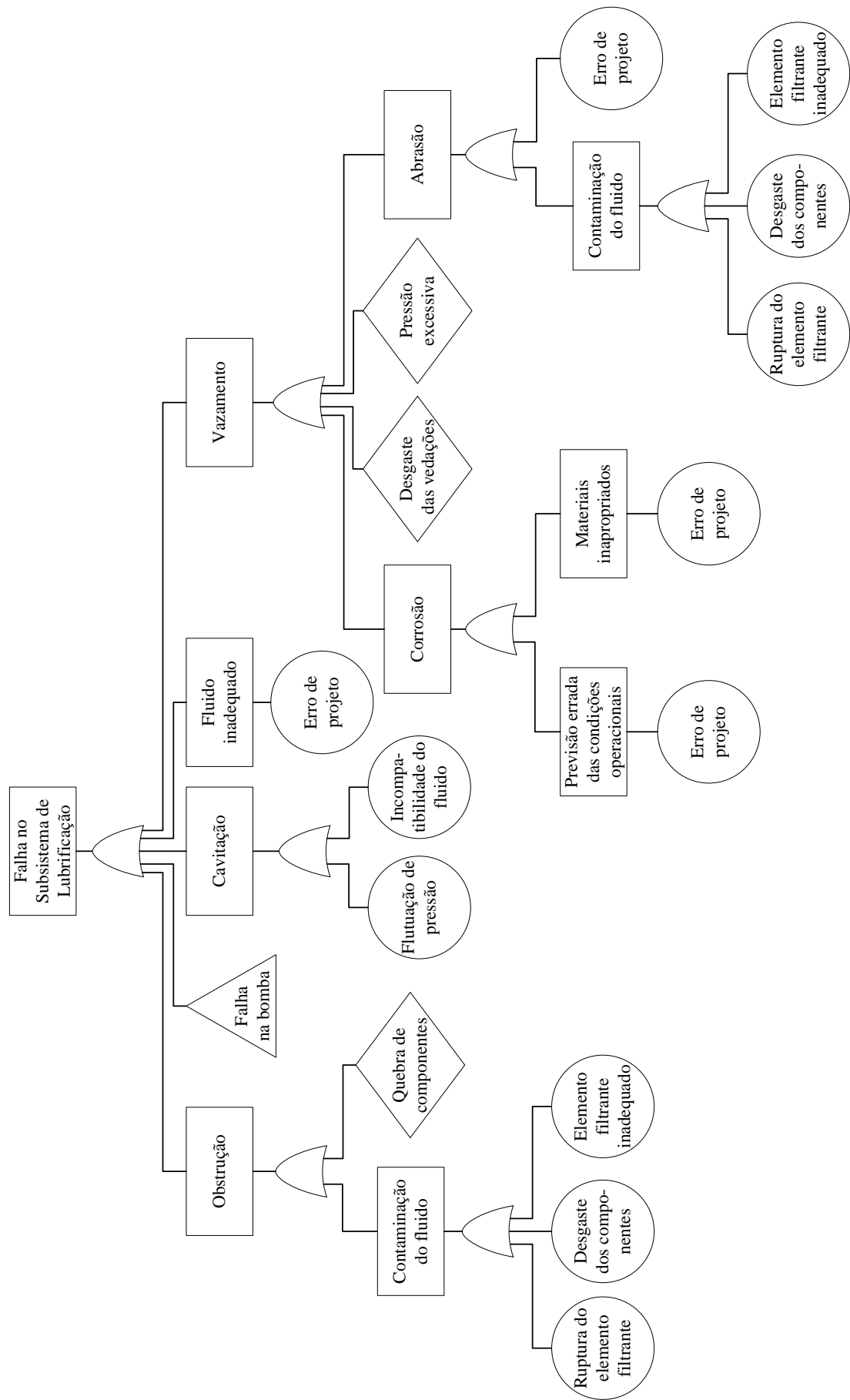
Quadro 4 - FMEA para os subsistemas bomba e de lubrificação

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	9	Obstrução	2	1	921 (18)
			Vazão reduzida na saída da bomba		Vazamento			
			Vazão variável na saída da bomba		Ruptura do pistão			
			Vibração excessiva		Cavitação			
			Ruído excessivo		Falta de aperto			
			Temperatura elevada		Falta de alinhamento			
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	6	Obstrução	1	1	611 (6)
			Vibração excessiva no subsistema de transmissão		Vazamento			
			Ruído excessivo no subsistema de transmissão		Fluido lubrificante inadequado			
					Falha da bomba do subsistema de lubrificação			

Fonte: O autor¹.

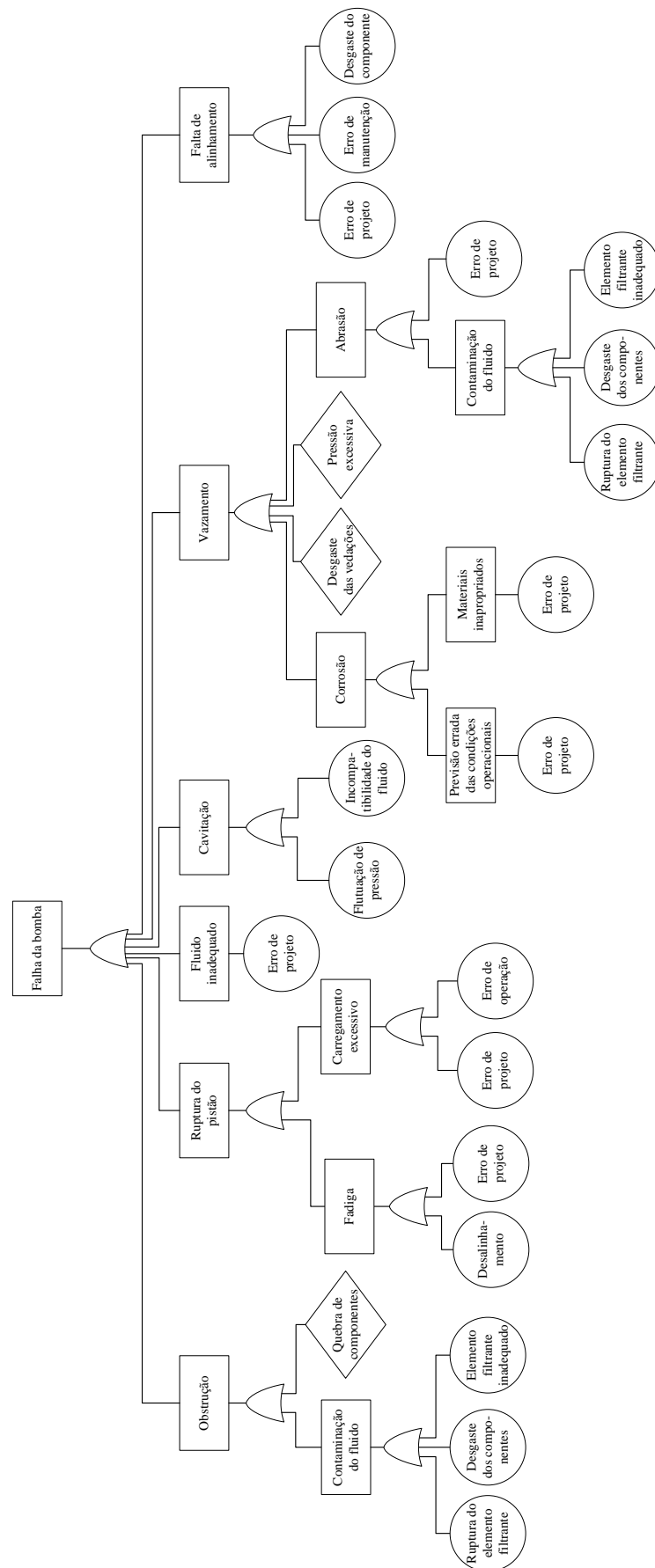
¹ As informações utilizadas para a elaboração do FTA e FMEA foram compiladas de diversas referências [1, 2, 4, 6 – 11, 13 – 16, 18, 20 – 24, 26, 28, 29, 31, 33, 34].

Figura 8 - FTA para o Subsistema de Lubrificação



Fonte: O autor¹.

Figura 9 - FTA para o Subsistema Bomba



Fonte: O autor¹.

3.3 ETAPA 3: ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta etapa são realizadas três atividades: análise dos cenários; busca de soluções e, por fim, indicação das recomendações para manutenção.

De modo qualitativo, a partir da análise do FTA (Figura 8 e Figura 9), percebe-se que existem várias causas que levam ao aumento da degradação ou mecanismo de degradação conforme mostrado no Quadro 5. Estes processos e causas estão relacionados com parâmetros operacionais, condições ambientais e requisitos de projeto do sistema técnico, como pode ser visto no Quadro 6.

Quadro 5 - Exemplos de mecanismos e causas de degradação nos subsistemas Bomba e de Lubrificação

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

Fonte: O autor.

Quadro 6 - Mecanismos e causas de degradação e parâmetros do sistema

Mecanismo ou causa para degradação	Parâmetro Operacional	Condições ambientais	Requisito de projeto
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 solidas em suspensão, umidade, salinidade	Monitoramento da condição do fluido.
Cavitação	Temperatura e pressão do processo, velocidade e viscosidade do fluido.	Temperatura do ambiente.	Especificação da bomba, dimensionamento da tubulação.
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.

De modo quantitativo, utilizando uma abordagem multiestado se é capaz de elucidar os processos de falhas por degradação mediante os estados intermediários entre os estados operacionais e de falha. 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 inicial e representa o total funcionamento do sistema;
- **Estado indicativo:** evento no qual o sistema começa a produzir efeitos perceptíveis que podem levar o 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 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 o estado operacional. A Tabela 2 mostra a probabilidade de cada um dos estados para o Subsistema Bomba e a Tabela 3 para o Subsistema de Lubrificação.

Tabela 2 - Probabilidade dos estados para o Subsistema Bomba

Subsistema Bomba				
Tempo de operação (h)	Estado			
	Operacional	Indicativo	Degradado	Crítico
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 3 - Probabilidade dos estados para o Subsistema de Lubrificação

Subsistema de Lubrificação				
Tempo de operação (h)	Estado			
	Operacional	Indicativo	Degradado	Crítico
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%

Fonte: O autor.

Tabela 3 - Probabilidade dos estados para o Subsistema de Lubrificação (continuação)

Subsistema de Lubrificação				
Tempo de operação (h)	Estado			
	Operacional	Indicativo	Degradado	Crítico
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.

A partir dessas análises e buscando soluções em artigos científicos, catálogos e manuais de fabricantes, e 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, pode-se formular recomendações técnicas conforme o Quadro 7.

Vale ressaltar que estes subsistemas são robustos, já que a probabilidade de ocorrência de um estado crítico é baixa, mesmo após um longo período de operação (ver Tabela 2 e Tabela 3). Outra percepção que pode ser vista é que o estado indicativo mostra onde existe a maior probabilidade de detecção da falha através dos efeitos. Assim, as recomendações técnicas: verificar a rotação da bomba; verificar a viscosidade do fluido e verificar possíveis obstruções, por exemplo, podem ser executadas no tempo de 16000 h, no caso do subsistema bomba.

Quadro 7 - 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; Verificar possíveis obstruções; 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 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 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.

4. CONCLUSÕES

Com aplicação da SisAD, foi-se capaz de elucidar a funcionalidade do sistema técnico, facilitando o entendimento dos efeitos e causas das falhas de cada um dos itens do sistema técnico. Além disso, a sistemática aplicada, ajudou na estruturação das informações mais relevantes do processo de degradação dos sistemas técnicos somando uma análise qualitativa destes processos.

Na terceira etapa da sistemática, analisou-se os cenários de falhas descrevendo quais são os parâmetros relacionados com a degradação e serviu, ainda, de base para busca do conhecimento para o tratamento dos efeitos da degradação no sistema de bombeamento. Além disso, pôde-se realizar uma análise quantitativa desses processos, o que auxiliou na determinação de uma periodicidade das ações de manutenções propostas no Quadro 7.

Outro ponto a ser ressaltado, é que para este caso tinham-se os dados de taxas de falhas. No entanto, na inexistência desses dados a SisAD pode nortear sua coleta 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.

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.

5. REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] 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>.
- [3] 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.
- [4] CALLISTER, W. D., **Materials science and engineering: An introduction**. John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [5] 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.
- [6] COLLINS, J. A., **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: Uma Perspectiva de Prevenção de Falha**, LTC, Rio de Janeiro, 2006.
- [7] 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>.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] ESREDA. **Ageing of Components and Systems**. Eds.: Lars Petterson and Kaisa Simola. An ESReDA Working Group Report. Det Norske Veritas, 2006.
- [11] 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>.
- [12] 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.ress.2012.12.011>.
- [13] KAGUEIAMA, H. A. **Sistematização de técnicas de análise de falha e projeto para confiabilidade**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.
- [14] 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).
- [15] LINSINGEN, I. Von. **Fundamentos de Sistemas Hidráulicos**. 2ª. Ed. revisada Florianópolis: Editora da UFSC, 2003. 399 p.
- [16] 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.
- [17] LISNIAWSKI, Anatoly; FRENKEL, Ilia; DING, Yi. Multi-state System Reliability Analysis and Optimization for Engineers and Industrial Managers. New York: Springer, 2010.
- [18] MITCHELL, Richard J., PIPPENGER, John J. **Fluid power maintenance basics and troubleshooting**. New York: Marcel Dekker, Inc., 1997.
- [19] OREDA. Offshore Reliability Data Handbook. Trondheim. 2002. 372p.
- [20] OIL & GAS UK. Guidance on the Management of Ageing and Life Extension for UKCS Oil and Gas Installations. Issue 1. 2011.
- [21] PARKER TRAINING. **Tecnologia Hidráulica Industrial**, Apostila M2001-1BR, São Paulo: Parker Hannifin Corporation, 1999.
- [22] PETERS, John. **Assessment of valve failures in the offshore oil & gas sector**. [s.l.]: Health and Safety Executive (HSE), 2003. 52 p.
- [23] POPOV, Valentin L. **Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications**. [s.l.]: Springer, 2010. 362 p.
- [24] RAVI, D.; ANDREIS, B. **Hydraulic System, Operation and troubleshooting for engineers & technicians**. 1º Ed. New York: Elsevier Science & Technology Books, 2005.
- [25] SAKURADA, E. Y. **Metodologia para análise de confiabilidade dinâmica**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013.
- [26] SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de Engenharia Mecânica**, 7ª Edição, bookman editora, 2005.
- [27] SINATORA, A. **Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte**. Prova de Erudição, São Paulo, 2005.
- [28] SOSNOVSKIY, Leonid A.. **Tribo-Fatigue: Wear-Fatigue Damage and its prediction**. [s.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2005. 428 p. (Foundations of Engineering Mechanics).
- [29] STOETERAU, R. L. **Tribologia**. Janeiro 2004. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [30] 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>
- [31] TOTTEN, George E.; WILL, David K.; FELDMANN, Dierk G. (Ed.). **Hydraulic Failure Analysis: Fluids, Components, and System Effects**. Philadelphia: ASTM, 2001. 601 p.
- [32] VERAS, R. M. **uma sistemática para análise de degradação de sistemas técnicos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.
- [33] VIEIRA, Rodrigo de Souza *et al.* **Elementos de máquinas**. 5. ed. Florianópolis: UFSC, 2013. 328 p. (Apostila).
- [34] 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.
- [35] 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.

[36] 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).