

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE**

GERALDO ANTONIO SIGNORINI FILHO

**ESTUDO DAS MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE DE UM MÓDULO
DE CONTROLE SUBMARINO APLICADO EM PRODUÇÃO DE
PETRÓLEO NO PRÉ-SAL**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

**CURITIBA
2019**

GERALDO ANTONIO SIGNORINI FILHO

**ESTUDO DAS MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE DE UM MÓDULO
DE CONTROLE SUBMARINO APLICADO EM PRODUÇÃO DE
PETRÓLEO NO PRÉ-SAL**

Monografia de Conclusão do Curso apresentada ao Programa de Pós-graduação em Especialização em Engenharia de Confiabilidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Confiabilidade.

Área de concentração: Tecnologia

Orientador: Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.

Co-orientador: Prof. Marcelo Rodrigues, Dr.

**CURITIBA
2019**



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Especialização em Engenharia da Confiabilidade



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DAS MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE DE UM MÓDULO DE CONTROLE SUBMARINO APLICADO EM PRODUÇÃO DE PETRÓLEO NO PRÉ-SAL

por

GERALDO ANTONIO SIGNORINI FILHO

Esta monografia foi apresentada 09 de agosto de 2019, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista Em Engenharia De Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Professor Orientador - UTFPR

Prof. Marcelo Rodrigues, Dr.
Professor Co-orientador - UTFPR

Prof. Wanderson Stael Paris, MSc.
Membro Titular da Banca - UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho à minha esposa e ao meu filho, pelo carinho, apoio e compreensão nos momentos de dedicação aos estudos.

RESUMO

SIGNORINI FILHO, Geraldo Antonio. **ESTUDO DAS MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE DE UM MÓDULO DE CONTROLE SUBMARINO APLICADO EM PRODUÇÃO DE PETRÓLEO NO PRÉ-SAL**. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo de confiabilidade quantitativo e qualitativo de um dos equipamentos mais relevantes do sistema de produção de óleo e gás submarina, o módulo de controle submarino (SCM). Como referência para o estudo foi utilizado o banco de dados global OREDA que possui dados de equipamentos similares utilizados no mundo todo por diversos clientes em diferentes ambientes. A metodologia aplicada neste trabalho utilizou como estudo de caso o módulo de controle submarino operado no pré-sal brasileiro. Com base no estudo funcional do equipamento, e nos dados coletados em campo foram aplicadas ferramentas estatísticas para definir as distribuições estatísticas de falha desse equipamento a fim de compreender os padrões de falha desse equipamento. O conjunto de dados coletados foram baseados em 89 SCMs que se encontram operando nos campos brasileiros, e por fim foi feita a comparação com o banco de dados global OREDA 2015 a fim de identificar pontos de melhoria. Como resultado, foi possível identificar os subsistemas com maior impacto nas métricas de confiabilidade do SCM, além de calcular a confiabilidade, a taxa de falha e tempo médio entre falhas do objeto da pesquisa o que possibilitou enquadrá-lo dentro dos equipamentos acima da média de desempenho de acordo com a base de dados OREDA. A metodologia aplicada se mostrou relevante para aumentar a visibilidade sobre o desempenho do equipamento, bem como identificar oportunidades para aumentar a disponibilidade do SCM.

Palavras-chave: Análise de dados de vida. Distribuição estatística. Produção de óleo e gás submarina. Engenharia de Confiabilidade.

ABSTRACT

SIGNORINI FILHO, Geraldo Antonio. **RELIABILITY STUDY OF SUBSEA CONTROL MODULE APPLIED FOR OIL PRODUCTION AT BRAZILIAN PRE-SALT**. Thesis (Master in Reliability Engineering) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

This work developed a quantitative and qualitative reliability study focused in a critical asset which is part of the oil and gas Subsea Production System, this equipment is the Subsea Control Module (SCM). As a benchmark for this study it was used the Offshore and Onshore Reliability Database, known as OREDA which has failure data information about similar equipment applied all over the world in different environments and by different customers. The methodology proposed by this study was applied on the SCMs installed and operating in the Brazilian pre-salt. The development of the work was based on the functionality analysis of the system as well as its critical subsystems, and on the failure data gathered from the field operations. The data was collected from a population of 89 SCMs, this dataset was analyzed and processed through statistical methods to determine which statistical distribution adjust better to the dataset in order to evaluate the failure pattern of the system. As part of the study all the reliability metrics were compared with the OREDA 2015 benchmark with the objective to identify improvement opportunities. As final results from the study it was possible to determine the subsystems that impact the SCM's reliability metrics, as well as calculate the reliability, failure rate and mean time between failures of the system that enabled to fit the SCM as a system that is performing above the average as per OREDA benchmark. It was possible to demonstrate the methodology applied in this study works very well to increase the visibility of the asset performance, as well as identify improvement opportunities focused on increasing system reliability.

Keywords: Life data analysis. Statistical distribution. Subsea oil and gas production. Reliability Engineering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Gráfico com a evolução do preço do barril de petróleo desde 2010.	17
Figura 2.2: Ilustração de um sistema de produção submarino de petróleo e gás.	20
Figura 2.3: Árvore de Natal Molhada utilizada nos poços do pré-sal brasileiro.	21
Figura 2.4: Exemplo de configuração de uma ANM convencional.	21
Figura 2.5: Ilustração de um sistema de produção submarino de petróleo e gás.	22
Figura 2.6: Esquemática de um sistema de controle submarino e principais componentes.	25
Figura 2.7: Exemplo de cabeamento umbilical com vias elétricas e hidráulicas.	26
Figura 2.8: Módulo de Controle Submarino, a) Fase final de montagem; b) Finalizado e testado.	29
Figura 2.9: Foto do interior de um módulo eletrônico submarino.	29
Figura 2.10: Ilustração de um módulo eletrônico submarino.	30
Figura 2.11: Diagrama simplificado de um Módulo de Control Submarino.	31
Figura 2.12: Diagrama simplificado de um módulo eletrônico submarino.	32
Figura 2.13: Válvula de controle direcional, DCV.	33
Figura 2.14: Ilustração do funcionamento da válvula DCV.	34
Figura 2.15: Conectores elétricos para aplicação submarina. a) Conector macho. b) Cabeamento elétrico com dois conectores fêmea.	34
Figura 2.16: Ilustração de como um par de conectores submarinos funciona.....	35
Figura 2.17: Conectores hidráulicos.	35
Figura 2.18: Desenho esquemático dos principais componentes dos conectores hidráulicos.	36
Figura 2.19: Ilustração dos dois modelos de acumuladores utilizados em aplicações submarinas.	37
Figura 3.1: Diagrama de blocos com quatro níveis de profundidade (Sistema, Equipamento, Conjunto e Componente).	41
Figura 3.2: Diagrama de blocos de um sistema série.	42
Figura 3.3: Gráfico exemplo com 6 arranjos diferentes com 1,2, 3, 5, 10 e 20 elementos em série.	43
Figura 3.4: Diagrama de blocos de um sistema paralelo.	44
Figura 3.5: Gráfico exemplo com 6 arranjos diferentes com 1, 2, 3, 5, 10 e 20 elementos em paralelo.	45
Figura 3.6: Diagrama de blocos em sistema k-em-n.	46
Figura 3.7: a) Representação de um Sistema com redundância ativa; b) e Sistema com redundância passiva.	47
Figura 3.8: Efeito da redundância na confiabilidade e taxa de falha de um sistema.	47
Figura 3.9: Comparação entre redundância Passiva e Ativa.....	48
Figura 3.10: Deterioração no tempo de utilização antes de remoção para reparo de turbinas de aeronaves.	50
Figura 3.11: Ilustração de dados completos.	52
Figura 3.12: Ilustração de dados suspensos, ou censurados à direita.	53
Figura 3.13: Ilustração de dados de inspeção, ou dados censurados em intervalos.....	53
Figura 3.14: Ilustração de dados censurados à esquerda.	54
Figura 3.15: Distribuição Weibull com dois parâmetros, variando β de 0,5 a 5.	56
Figura 3.16: Exemplo de sistema com 4 elementos.	60
Figura 3.17: Exemplo de simulação com duas falhas e um reparo que ocorrem durante a vida do sistema.	61

Figura 4.1: Fluxograma da metodologia aplicada neste trabalho.	69
Figura 4.2: Árvore de falhas do SCM.	72
Figura 4.3: Representação dos dados de tempo até falha de SCMs instalados no Brasil.	74
Figura 4.4: Histograma da base de dados de SCMs instalados no Brasil.	75
Figura 4.5: Gráfico representando a métrica de Confiabilidade no tempo para as duas bases de dados.	78
Figura 4.6: Gráfico representando a métrica de taxa de falha no tempo para as duas bases de dados.	78
Figura 4.7: Gráfico representando a métrica de Confiabilidade no tempo para as duas bases de dados.	84
Figura 4.8: Gráfico representando a métrica de Taxa de Falha no tempo para as duas bases de dados.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Parâmetros calculados através do método MLE para a distribuição Weibull de dois parâmetros.	75
Tabela 4.2: Cálculo das métricas de Confiabilidade e Taxa de Falha para diferentes tempos de vida.	76
Tabela 4.3: Tempo médio entre falhas de acordo com a distribuição estatística das duas bases de dados.	77
Tabela 4.4: Valores de taxa de falha para 10e6 horas de operação, conforme base de dados OREDA 2015.	79
Tabela 4.5: Valores de taxa de falha para 10e6 horas de operação, conforme base de dados OREDA 2015.	82
Tabela 4.6: Valores de taxa de falha e Confiabilidade das duas bases de dados.	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1: Quadro utilizado na base de dados OREDA.	63
Quadro 3.2: Tabela exemplo com dados sobre Bombas Centrífugas.	64
Quadro 3.3: Quadro com modos de falha para uma bomba centrífuga.	67
Quadro 4.1: Cabeçalho da planilha utilizada para coleta dos dados.	71

LISTA DE ABREVIACÖES

OREDA	<i>Offshore and Onshore Reliability Data</i>
SCM	<i>Subsea Control Module</i>
SPS	<i>Subsea Production System</i>
ANM	<i>Árvore de Natal Molhada</i>
FPSO	<i>Floating Production, Storage and Offloading</i>
SEM	<i>Subsea Electronic Module</i>
VMP	<i>Válvula Mestre de Produção</i>
MCS	<i>Master Control Station</i>
DCV	<i>Directive Control Valve</i>
IWIS	<i>Intelligent Well Interface Standardization</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
RAM	<i>Reliability, Availability and Maintainability analysis</i>
MTTF	<i>Mean Time To Failure</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
RBD	<i>Reliability Block Diagram</i>
LRU	<i>Line Replaceable Unit</i>
CDF	<i>Cumulative Density Function</i>
PDF	<i>Probability Density Function</i>
RRX	<i>Rank Regression on X</i>
RRY	<i>Rank Regression on Y</i>
MLE	<i>Maximum Likelihood Estimator</i>
ISO	<i>International Standards Organization</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
TTF	<i>Time To Failure</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.2. OBJETIVOS	13
1.2.1. Objetivo Geral	14
1.2.2. Objetivos Específicos	14
1.3. JUSTIFICATIVA	14
1.4. METODOLOGIA.....	15
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2. OBJETO DE PESQUISA	17
2.1. MERCADO DE ÓLEO E GÁS	17
2.2. EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE UM CAMPO DE PETRÓLEO.....	18
2.3. EQUIPAMENTOS PARA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO	19
2.3.1. Árvore de Natal Molhada	20
2.3.2. Sistema de Controle Submarino	23
2.3.2.1. Introdução ao Sistema de Controle de Produção	23
2.3.3. Módulo de Controle Submarino	28
2.4. RESUMO DO CAPÍTULO	37
3. REFERENCIAL TEÓRICO	38
3.1. CONCEITOS DE CONFIABILIDADE	38
3.1.1. Confiabilidade de Sistemas	39
3.1.2. Diagrama de Blocos de Confiabilidade	40
3.1.3. Redundância	46
3.1.4. Sistemas Reparáveis, Não-reparáveis e LRU	49
3.2. ANÁLISE DE DADOS DE VIDA	51
3.2.1. Classificação dos Dados de Vida	51
3.2.2. Modelos de Distribuição de Dados de Vida	54
3.2.3. Estimativa de Parâmetros	57

3.3.	ANÁLISE RAM	58
3.3.1.	Modelagem do Sistema	59
3.3.2.	Diagramas Analíticos	59
3.3.3.	Diagramas de Simulação	60
3.4.	BANCO DE DADOS	62
3.4.1.	<i>Offshore and Onshore Reliability Database - OREDA</i>	63
3.5.	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	68
4.	DESENVOLVIMENTO	69
4.1.	METODOLOGIA APLICADA	69
4.2.	COLETA DE DADOS	70
4.3.	ANÁLISE FUNCIONAL DO SCM	71
4.4.	ANÁLISE DOS DADOS DE VIDA DO SCM	73
4.5.	ANÁLISE DOS DADOS OREDA E COMPARAÇÃO COM O MÓDULO DE CONTROLE SUBMARINO ESTUDADO	80
4.6.	OPORTUNIDADES PARA AUMENTO DA DISPONIBILIDADE	81
4.7.	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	82
5.	CONCLUSÃO	86
5.1.	DIFICULDADES ENCONTRADAS	87
5.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS	89

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo traz a apresentação do tema, objetivos da pesquisa, justificativas, a metodologia aplicada e a forma de estruturação do trabalho.

O foco da pesquisa será a comparação entre a confiabilidade de projeto do módulo de controle submarino utilizado no pré-sal do Brasil e outras regiões de produção de óleo e gás submarino, e a estatística das falhas registradas nos principais projetos onde esse módulo foi utilizado de 2010 a 2018.

1.1. PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

O módulo de controle submarino é um ativo que pertence ao conjunto de equipamentos utilizados para produção de petróleo. Esse módulo tem grande importância para a produção em águas profundas e ultraprofundas pois reduz o custo, e automatiza diversas operações.

Para o desenvolvimento de um campo são realizados cálculos de métricas de confiabilidade afim de atingir o nível de disponibilidade desejado pelo cliente. A base de dados, *Offshore and Onshore Reliability Data* - OREDA, que contém dados de diversos equipamentos da indústria de óleo e gás é comumente utilizada como referência para esses cálculos. Contudo, essa base de dados limita-se em fornecer uma taxa de falha constante para cada um dos equipamentos, desconsiderando a distribuição das falhas ao longo da vida do equipamento.

Dessa forma a pesquisa realizada um estudo estatístico das métricas de confiabilidade a fim de responder qual é a distribuição estatística que melhor representa esse ativo, além de apresentar as métricas de confiabilidade e comparar com a referência global OREDA.

1.2. OBJETIVOS

O interesse desta pesquisa é apresentar uma análise das métricas de confiabilidade do módulo de controle submarino utilizando dados de falhas registradas em campo a fim de comparar com referências globais, como OREDA.

1.2.1. Objetivo Geral

Desenvolver um estudo das métricas de confiabilidade atualizado com dados de falhas registrados em campo.

Com esse estudo será possível definir quais são as principais métricas de confiabilidade do módulo de controle submarino e definir possíveis ajustes de conceito e melhorias necessárias em peças críticas do equipamento, a fim de garantir uma maior confiabilidade e conseqüentemente uma redução no custo operacional.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral será necessária realizar:

- Compilação dos dados de falha registrados durante operações no campo;
- Análise de referências bibliográficas a fim de entender o comportamento padrão de componentes críticos envolvidos no sistema;
- Estudo estatístico dos dados compilados;
- Determinar as variáveis que devem ser consideradas no estudo e qual a sua influência na confiabilidade do equipamento.

1.3. JUSTIFICATIVA

O principal motivo para o desenvolvimento da pesquisa foi a diferença entre a confiabilidade de projeto, e publicada conforme OREDA, e a confiabilidade observada nos projetos onde o módulo de controle submarino foi utilizado. O desempenho do módulo estava abaixo do especificado, mesmo mantendo o poço disponível os custos com mobilização e manutenção não correspondiam ao desejado.

Somando ao fato de que o módulo de controle submarino avaliado não está correspondendo a confiabilidade desejada, o mercado da indústria de óleo e gás sofreu seu maior declínio na história entre os anos de 2014 e 2017 tornando o estudo proposto neste trabalho ainda mais relevante.

Contextualizando o declínio do mercado de óleo e gás, o indicador mais importante a ser observado é o preço do barril de petróleo atingiu US\$ 115 em Junho

de 2014, e os anos seguintes foram marcados por uma sucessão de quedas até atingir US\$ 27 em Janeiro de 2016 fato que expôs de forma clara os ativos que não atendiam às expectativas de confiabilidade, uma vez que esta está diretamente relacionada ao custo operacional.

Dentro do ciclo de vida de um poço de petróleo, que inicia-se nos estudos geofísicos e sísmicos, até o abandono do poço, focaremos o detalhamento em alguns elementos da fase de produção na qual o módulo de controle submarino é aplicado.

Para as operadoras de campos de petróleo, a disponibilidade de um poço ou até mesmo de um campo por completo é algo que é traduzido diretamente em valores monetários. Por exemplo a área do pré-sal no Brasil, a qual possui poços que produzem 30 mil barris de petróleo por dia de acordo com relatórios da Petrobras detalhados por Moraes (2015) em seu estudo, cerca de 1250 barris por hora o que seriam aproximadamente US\$ 50 mil sem considerar os custos operacionais com estrutura, pessoal e insumos que praticamente dobra o valor de parada por hora, chegando a aproximadamente US\$ 100 mil. Pode-se notar então que a disponibilidade de um sistema que produz petróleo ou gás é extremamente crítico em termos econômicos, por consequência a confiabilidade e a manutenibilidade de sistemas submarinos de produção são igualmente relevantes para a viabilidade dessa indústria.

O módulo de controle submarino (*Subsea Control Module - SCM*), é um equipamento complexo com subsistemas elétricos, mecânicos e hidráulicos. Essa complexidade o torna interessante do ponto de vista do estudo, uma vez que diferentes modos de falha e componentes farão parte do estudo de confiabilidade. O SCM é um excelente caso pois é um equipamento padronizado em todo o mercado mundial utilizando o mesmo conceito e os uma quantidade limitada de fornecedores de peças críticas.

1.4. METODOLOGIA

Este estudo é de caráter teórico, contudo utilizando dados de falhas reais em diferentes partes do mundo com o mesmo equipamento. O estudo é baseado em conceitos e definições da engenharia da confiabilidade e estatística, bem como dados atuais do mercado de óleo e gás. A pesquisa é do tipo científica explicativa, pois tem como objetivo comparar a disponibilidade projetada com a real atingida até o momento. A pesquisa abrangerá as seguintes fases:

- Pesquisa baseada na revisão da literatura;
- Estudo dos dados de tempo até falha e as causas dessas falhas;
- Análise de disponibilidade versus custo operacional;
- Apresentação do resultados e oportunidades de melhoria identificadas durante o estudo.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será apresentado em seis capítulos. Este primeiro capítulo faz de forma sucinta a introdução ao estudo, onde se apresenta o tema, os objetivos, as justificativas e metodologia que será adotada.

O capítulo dois apresenta em detalhe o tema e o objeto de pesquisa, descrevendo a situação do mercado de óleo e gás, o equipamento foco do estudo, os subsistemas e componentes críticos estudados.

No terceiro capítulo consta o referencial teórico da engenharia de confiabilidade, incluindo análise de dados de vida e conceitos estatísticos para estudar o tema. Adicionalmente, a metodologia utilizada no banco de dados *Offshore and Onshore Reliability Data*.

O capítulo quatro contém o estudo dos dados compilados de tempos de falha, bem como a análise estatística dos dados, e a análise funcional do objeto da pesquisa.

Por fim as conclusões sobre o trabalho. Relata-se também sobre as dificuldades encontradas, as soluções para as dificuldades encontradas e as proposições para trabalhos futuros.

2. OBJETO DE PESQUISA

Este capítulo descreve em detalhes o tema e o objeto de pesquisa. Apresenta as especificações e características do equipamento, objeto do estudo, bem como seu funcionamento e seus subsistemas.

Conforme capítulo anterior, esta monografia busca apresentar um estudo de confiabilidade de um módulo de controle submarino, a comparação com a base de dados global de falhas de equipamentos utilizados em campos de produção de petróleo (OREDA), e por fim analisar as formas que o equipamento pode ter seus sistemas ajustados para uma melhor performance de confiabilidade. O foco da análise buscará uma melhor relação custo-desempenho visando aumento de vida útil.

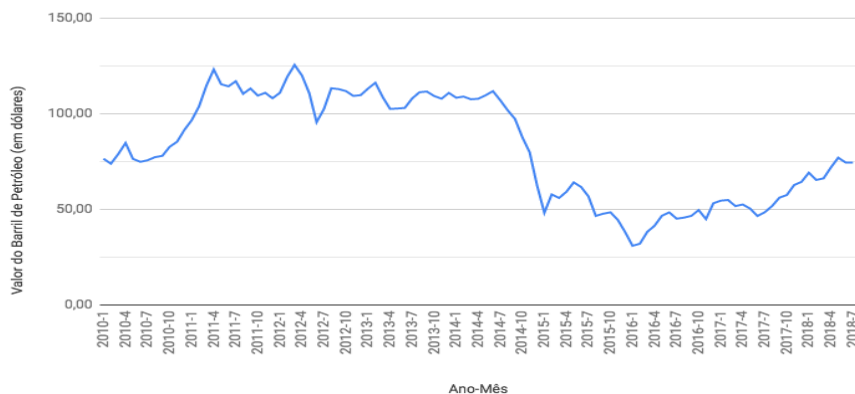
2.1. MERCADO DE ÓLEO E GÁS

Antes de entrar no detalhamento do objeto da pesquisa é fundamental entender o contexto do mercado de petróleo e gás.

O período que vai de Jan-2011 a Jun-2014 o valor do barril de petróleo era negociado no mercado mundial a valores acima de US\$ 100 conforme constam nos históricos das mais movimentadas bolsas de valores do mundo e discutido por Singer (2015) em seu artigo. Nesse período o custo de produção de uma unidade de barril de petróleo no Brasil era de aproximadamente US\$ 15 (IBP, 2016), atingindo um ponto de equilíbrio para um valor de mercado de aproximadamente US\$ 43 (PETROBRAS, 2017).

Figura 2.1: Gráfico com a evolução do preço do barril de petróleo desde 2010.

Média do preço do Barril de Petróleo de 2010 a 2018



Fonte: Federal Reserve Bank of St. Louis, U.S. Energy Information Administration (Fred, 2018).

A crise de oferta e demanda de petróleo que iniciou-se em 2014 afetou fortemente o valor de negociação do barril de óleo, chegou a atingir o mínimo de US\$ 26 em Jan-2016 fazendo que muitos países e campos de petróleo se tornassem inviáveis economicamente. Esse fato exigiu das operadoras de energia, as quais controlam a produção de petróleo, tomassem medidas drásticas para se manterem competitivas e saudáveis financeiramente. Logo, o desafio se voltou para a questão de eficiência e custos de produção. O barril do petróleo é negociado atualmente a aproximadamente US\$ 60, e tanto a Petrobras, quanto outras operadoras estão buscando um ponto de equilíbrio econômico por barril cada vez menor. Essa redução nas margens ainda é um desafio visto que os investimentos para exploração e produção de um campo de petróleo apresentam um retorno de longo prazo considerando o cenário atual.

2.2. EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE UM CAMPO DE PETRÓLEO

Para que seja possível extrair óleo ou gás de um reservatório de hidrocarbonetos diversas etapas são necessárias, desde compra dos direitos de exploração de um certo campo até o bombeamento efetivo de óleo ou gás. Quase todas as disciplinas da engenharia são empregadas, além de áreas de suporte e gestão que são fundamentais para que um projeto seja rentável e viável.

Sem entrar em detalhes contratuais ou de legislação que variam dependendo do país onde o campo está localizado, a exploração de um campo de petróleo pode ser dividida em algumas etapas, sendo que uma dessas etapas compreende a instalação dos equipamentos submarinos de produção e a produção de óleo e gás, propriamente dita.

Na vida de um poço de petróleo existem centenas de equipamentos que são fundamentais para que o processo produtivo ocorra. Esses equipamentos que contribuem para a produção podem ser chamados de ativos, uma vez que esses equipamentos necessitam de um investimento para a aquisição e permitirão que receita seja gerada pela empresa que os utiliza. Dentre esses ativos, esse estudo irá aprofundar a análise em um equipamento específico, o Módulo de Controle Submarino (*Subsea Control Module - SCM*).

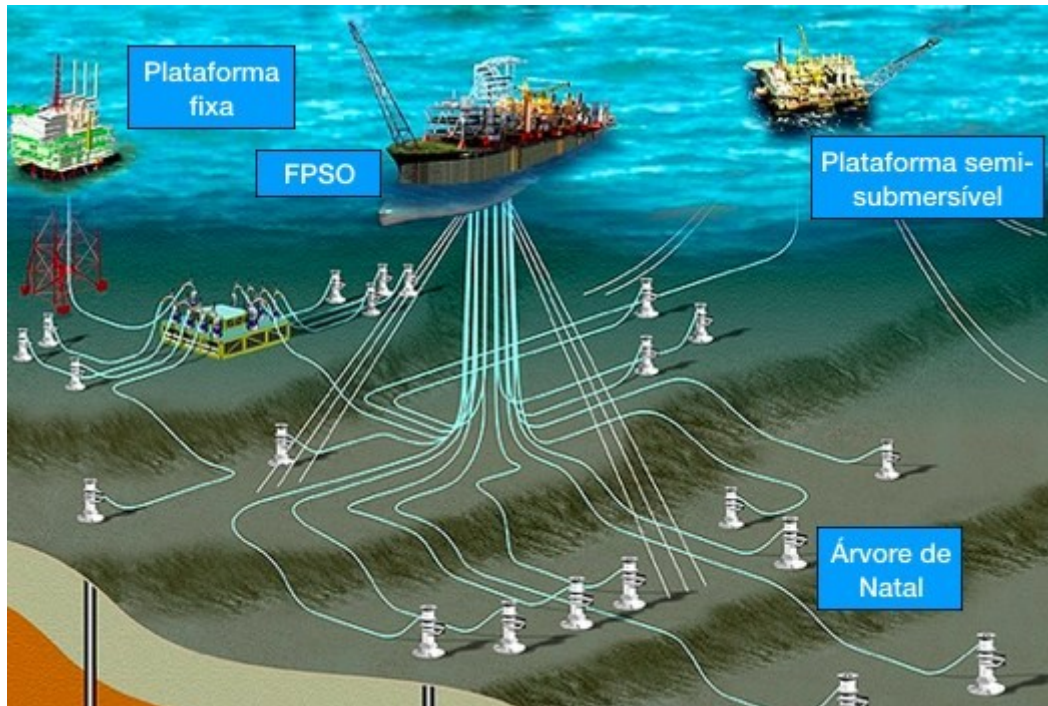
2.3. EQUIPAMENTOS PARA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

O processo de produção de petróleo e/ou gás de formações rochosas submarinas necessita de uma estrutura que é comercialmente chamada de Sistema de Produção Submarina (*Subsea Production System - SPS*). Essa infraestrutura depende das leis ambientais do país, dos requisitos técnicos das operadoras que irão produzir, e também das limitações do local de instalação. Contudo, iremos descrever um pouco sobre dois equipamentos que fazem sentido para esse estudo: a Árvore de Natal Molhada (ANM), e o Módulo de Controle Submarino (*Subsea Control Module - SCM*).

Na Figura 2.2 pode-se observar alguns elementos de um Sistema de Produção Submarina. A Unidade flutuante de armazenamento e transferência (*Floating Production, Storage and Offloading - FPSO*) é uma embarcação de grande porte que possui capacidade para se conectar aos poços de petróleo, armazenar a produção desses poços, transferir para outras embarcações ou navegar para descarregar a produção. Os FPSOs são utilizados em locais onde a profundidade até o solo marinho (lâmina d'água) excede os 1000m, caso do pré-sal brasileiro. As plataformas fixas são geralmente utilizadas para a mesma função do FPSO, com a limitação de locomoção e utilizadas geralmente até profundidades de 200m de lâmina d'água. As plataformas semi-submersíveis são utilizadas principalmente para perfuração, e outras operações nos poços ou equipamentos submarinos. Outro elemento destacado na Figura 2.2 é a árvore de natal molhada (ANM) que tem como principal função controlar a vazão do poço de petróleo e/ou gás. Uma informação complementar sobre os poços de petróleo é que outros elementos como cabeça de poço, base adaptadora de produção e sistemas de injeção fazem parte do Sistema de Produção Submarino, mas não serão discutidos neste trabalho.

O módulo de controle submarino é um equipamento utilizado em conjunto com a ANM, que foi desenvolvido com o objetivo de otimizar custos para produção de petróleo em águas profundas (acima de 2000m de lâmina d'água).

Figura 2.2: Ilustração de um sistema de produção submarino de petróleo e gás.



Fonte: Diário do Pré-sal (2014).

2.3.1. Árvore de Natal Molhada

A ANM, ou Árvore de Natal Molhada (Figura 2.3), tem como principal função controlar a vazão de qualquer fluido do poço de produção de óleo e gás.

Para executar essa função esse equipamento é composto por alguns elementos fundamentais que são o corpo principal que tem função de suportar as pressões tanto externa, da água do mar, quanto interna, do fluido do poço; as válvulas que farão o controle da vazão do poço; e os sensores que possibilitam o monitoramento de pressão, temperatura e outros parâmetros sobre a condição do poço. Existem muitos outros componentes importantes na ANM, contudo o foco será nas válvulas e sensores que tem direta relação com o módulo de controle submarino.

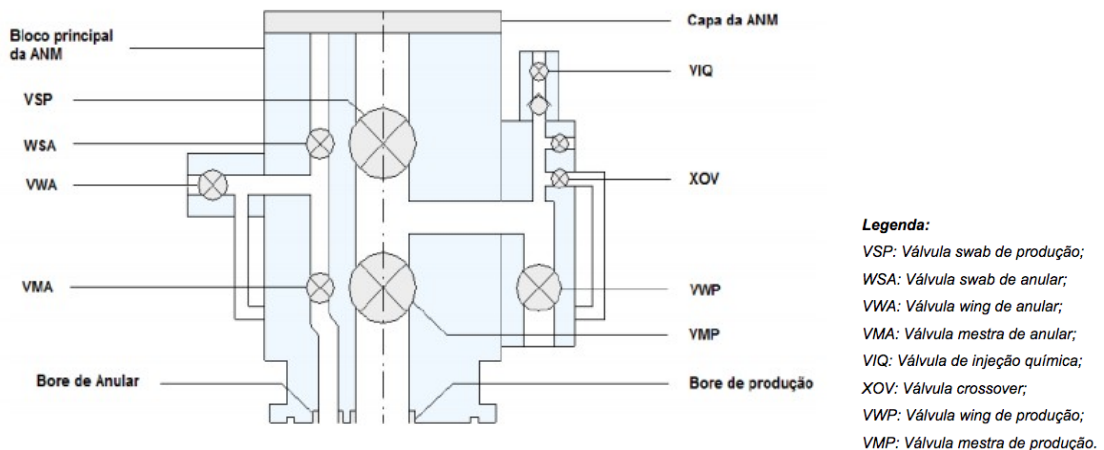
Figura 2.3: Árvore de Natal Molhada utilizada nos poços do pré-sal brasileiro.



Fonte: Arquivo pessoal (2018).

A Figura 2.4 ilustra um exemplo de configuração de uma ANM, que nesse caso é do tipo convencional (ou também chamada de vertical) a qual é o modelo com maior aplicação no mundo atualmente. Uma de suas características é possuir tanto a linha de produção, quanto a de anular no plano vertical.

Figura 2.4: Exemplo de configuração de uma ANM convencional.



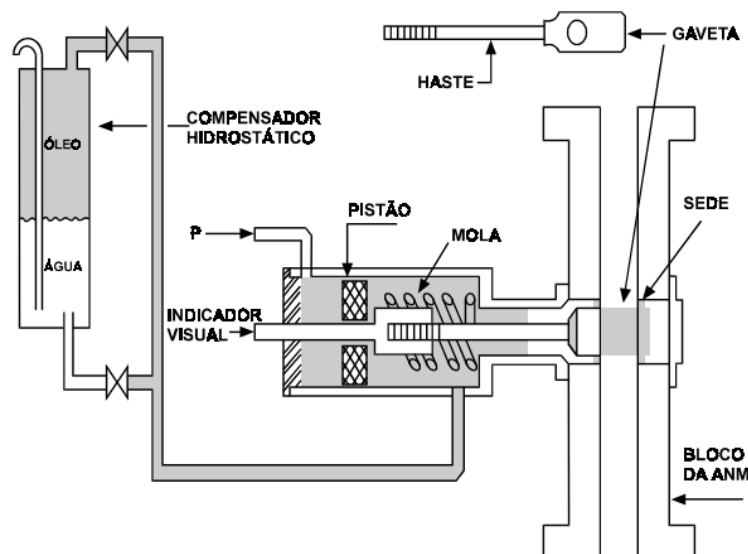
Fonte: Autor (2018).

2.3.1.1.Principais Válvulas de uma Árvore de Natal Molhada

As válvulas presentes na árvore submarina têm como objetivo permitir o escoamento de hidrocarbonetos de maneira segura até a superfície, fechar o poço em caso de influxo indesejado e injetar produtos químicos para diversos fins. Elas podem ser controladas remotamente, utilizando sistemas de controle na unidade de produção ou plataforma, utilizando mergulhadores ou veículos pilotados remotamente (Bellarby, 2009).

A Figura 2.5 mostra o funcionamento de uma válvula do tipo sede-gaveta. As válvulas sede-gaveta possuem uma parte móvel com um orifício que permite a passagem do fluido, chamada de gaveta, que fica fechada quando o pistão não está sob pressão e, quando o pistão é pressionado, o mesmo move a gaveta para que a válvula se abra; e uma parte fixa, chamada de sede, a qual possui uma cavidade onde a gaveta pode se alojar quando for acionada.

Figura 2.5: Ilustração de um sistema de produção submarino de petróleo e gás.



Fonte: Diário do Pré-sal (2014).

O acionamento das válvulas, que possibilita o controle de produção e também garante a segurança da operação, varia de acordo com o tipo de sistema de controle especificado em projeto.

2.3.2. Sistema de Controle Submarino

Como apresentado no início do capítulo, a indústria de petróleo vem sofrendo um desgaste devido a redução das margens tornando necessárias mudanças que auxiliem a produção de petróleo e gás ser menos custosa. Dessa maneira, as operações de exploração e produção necessitam, cada vez mais, de novas tecnologias que ao mesmo tempo que: permitem ultrapassar barreiras físicas e ambientais desafiadoras como é o caso das águas ultra-profundas; também reduzam o custo de investimento e operacional dessa indústria. É nesse cenário que os sistemas de controle são fundamentais.

Um sistema de controle submarino é projetado para controlar os sistemas instalados no fundo do mar, além de realizar medição, monitoramento e controle de variáveis de processo. Para tanto, existem vários subsistemas elétricos e mecânicos. Para a construção de um sistema de controle é necessário, primeiramente, criar um modelo conceitual que descreve de maneira completa o processo a ser controlado. Após a criação de um modelo conceitual, é gerado um modelo matemático no qual será baseada a análise dos resultados. Posteriormente, em posse dos resultados, o sistema de controle poderá agir de acordo com sua programação, baseando-se na análise dos resultados obtidos e dos valores de referências programados em sua memória (Anand, 2013).

2.3.2.1. Introdução ao Sistema de Controle de Produção

O sistema de controle da produção é responsável por acionar e monitorar as válvulas localizadas na ANM, através da análise de parâmetros medidos em sensores localizados em vários pontos de interesse dentro do sistema de produção. Os parâmetros que costumam ser medidos nesses sensores são pressão, temperatura e vazão.

De acordo com a norma ISO 13628-6 (2017), os sistemas de controle da produção precisam atender aos seguintes requisitos funcionais:

- Prover operabilidade para todas as válvulas submarinas controladas remotamente;

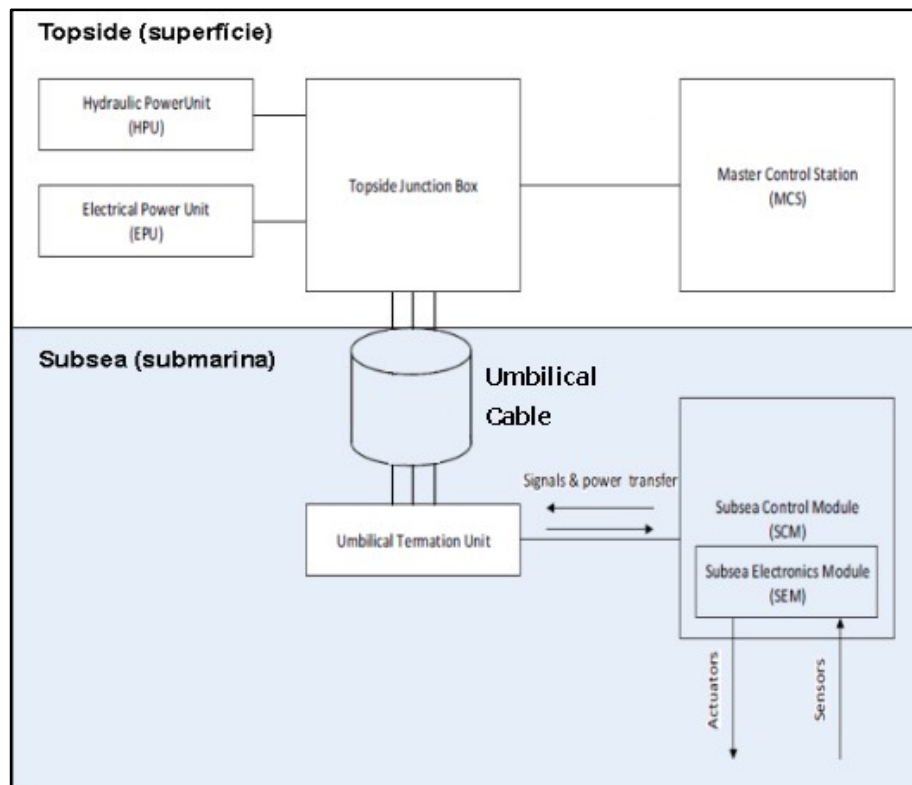
- Prover dados e informações suficientes para o sistema de controle operar de forma segura e responder adequadamente às condições que requirem parada de produção;
- Prover paradas de produção de emergência de forma segura, assegurando que o sistema de controle submarina responda corretamente e dentro do tempo especificado na norma ou pelas autoridades competentes.

Ao projetar um sistema de controle é necessário escolher a posição e a distribuição de seus elementos cuidadosamente, de modo a otimizar a eficiência do sistema, uma vez que, a disposição dos equipamentos e instrumentos de controle irá impactar diretamente os custos do projeto. (Noguchi, 2014, p. 20).

O controle de um sistema de produção submarino é realizado por meio de equipamentos instalados no leito marinho, junto à malha de produção, e unidades de controles localizados na plataforma. Em lâminas d'água profundas e ultraprofundas, onde não é possível realizar intervenção humana, é preciso garantir que a resposta dos equipamentos seja suficiente para solucionar alguma anormalidade que ocorra durante a vida útil do campo. Ou seja, em caso de emergência o sistema deve ser projetado para possibilitar o fechamento do sistema dentro de um determinado tempo de resposta.

A Figura 2.6, é uma representação de um sistema de controle de produção submarino. A parte superior da Figura 2.6 apresenta os equipamentos da superfície, localizados na unidade de produção (exemplo, FPSO), nele encontram-se a unidade de energia hidráulica, unidade de energia elétrica, estação mestre de controle e a caixa de conexão (*Junction Box*). As unidades de energias alimentam os equipamentos hidráulicos e elétricos, já a estação mestra de controle é responsável por enviar sinais de controle e receber dados de medição e respostas do sistema submarino. A caixa de conexão realiza então a tarefa de unir os meios de transmissão de energia e informações, da plataforma para a malha de produção localizada no leito marinho.

Figura 2.6: Esquemática de um sistema de controle submarino e principais componentes.



Fonte: Autor (2018), adaptado de Berven (2013).

A parte inferior da Figura 2.6, apresenta um sistema de controle submarino. Nele é possível identificar três unidades em especial, a unidade responsável por receber o umbilical (cabearamento responsável por conectar as unidades de potência hidráulica, potência elétrica e sinal aos equipamentos no leito marinho), o módulo de controle subsea e o módulo eletrônico subsea. Este último recebe informações dos sensores e transmite informações para a superfície, e aciona as válvulas de acordo com os comandos de controle fornecidos pelo módulo de controle. E é através dos umbilicais que ocorre a comunicação entre o sistema submarino e a unidade de produção (FPSO ou plataforma).

Figura 2.7: Exemplo de cabeamento umbilical com vias elétricas e hidráulicas.



Fonte: Arquivo pessoal (2018).

Como é mostrado na Figura 2.6, a informação percorre um caminho de mão dupla, da plataforma para o sistema submarino e do sistema marinho para a plataforma.

Bai e Bai (2010) descreve os tipos básicos de sistemas de controle de um sistema de produção submarino da seguinte forma:

- **Hidráulico Direto:** o mais simples e antigo dos sistemas de controle submarino, no qual cada atuador necessita de uma linha de função hidráulica vindo da superfície para atuá-la. É possível que dois ou mais atuadores compartilhem uma mesma linha, entretanto eles serão simultaneamente atuados. Este tipo de sistema é eficiente para águas rasas e torna-se ineficiente para campos complexos e profundos, pois o tempo de atuação de uma válvula pode demorar horas. Ele tem como vantagens principais o baixo custo de implementação e, devido ao fato dos componentes críticos se encontrarem na superfície, possui alta confiabilidade e facilidade de manutenção. Este é o sistema mais empregado no Brasil atualmente e comumente é utilizado com monitoramento direto, ou seja, um par trançado de condutores para cada sensor do sistema. Esse sistema necessita de cabos umbilicais com mais vias, o que impacta diretamente no custo de investimento de um projeto.

- **Hidráulico Pilotado:** assim como o sistema hidráulico direto, este possui uma linha dedicada para cada atuador, ou conjunto de atuadores com atuação simultânea, mas possui um módulo de controle submarino simples que contém válvulas piloto e acumuladores de pressão conectados aos circuitos hidráulicos para uma pressurização mais rápida, visto que a pressão hidráulica armazenada já está no leito marinho. Possui as mesmas vantagens do controle hidráulico direto, mas em um nível mais brando sendo um sistema de atuação considerada lenta.
- **Hidráulico Sequencial:** este sistema possui uma sequência fixa de abertura de válvulas, atuadas por uma única linha de pressão regulada. A primeira válvula, ou conjunto de válvulas, abrirá quando a pressão chegar a um valor pré-determinado e as demais válvulas abrirão em valores superiores também pré-determinados. Tal técnica possibilita um tempo de resposta menor do que os dos sistemas anteriores, assim como um cabo umbilical com menos vias. Sua principal desvantagem é a sequência fixa de abertura de válvulas.
- **Eletro-Hidráulico multiplexado:** este é o tipo de sistema de controle empregado atualmente em campos do pré-sal no Brasil, devido à grande profundidade das águas. Ele possui um módulo de controle submarino eletro-hidráulico mais complexo do que o do sistema hidráulico pilotado, pois o mesmo faz monitoramento dos parâmetros elétricos e faz atuação hidráulica das válvulas, sendo o controle dessa atuação feito por sinais elétricos multiplexados através de um único condutor elétrico (não considerando redundância ou canais extras). No cabo umbilical existe um número mínimo de linhas elétricas e mangueiras hidráulicas, suficiente para transportar pressão hidráulica (normalmente linhas de alta e baixa pressão) e sinal e potência elétricos. O módulo de controle submarino armazena a pressão hidráulica em seus acumuladores e com ela atua as válvulas dos equipamentos submarinos em pouco tempo. Desta forma, uma das principais vantagens desse sistema é o curto tempo de atuação das válvulas. Entretanto, este sistema é mais caro e somente se torna economicamente vantajoso quando com cabos

umbilicais muito extensos. Outro problema é que os equipamentos críticos se encontram no fundo do mar, tornando reparos e manutenção mais difíceis.

- **Elétrico:** este tipo de controle é o mais sofisticado dentre os apresentados pois, além do controle elétrico, utiliza válvulas elétricas. Somente sinal e potência elétrica são fornecidos ao sistema submarino. O custo do cabo umbilical e o tempo de atuação das válvulas é o menor de todos. Esse sistema ainda é pouco utilizado devido ao seu pequeno histórico de uso e às poucas alternativas de contornar um problema caso haja falha nos equipamentos. Por exemplo, caso o módulo de controle submarino eletro-hidráulico do sistema multiplexado venha a falhar, ainda é possível retirar o módulo e controlar o equipamento submarino através do controle hidráulico direto, o que não acontece com o elétrico (Noguchi, 2014, p. 23).

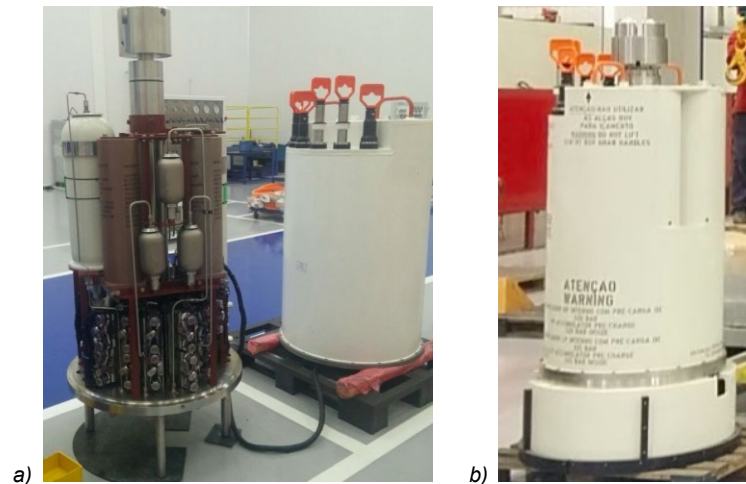
2.3.3. Módulo de Controle Submarino

Um Módulo de Controle Submarino (*Subsea Control Module*, SCM), Figura 2.8, é um equipamento submarino hermeticamente fechado em um único envelope com pressão compensada que é instalado em diversos equipamentos submarinos eletro-hidráulicos para controlá-los e monitorá-los. Dentre suas principais funções tem-se: acionamento dos atuadores e monitoramento dos sensores de campo.

Os SCMs são utilizados principalmente para diminuir o tempo de abertura das válvulas dos equipamentos submarinos conforme descrito no item 2.4.1.

Por exemplo, em um sistema de controle multiplexado pode-se armazenar pressão hidráulica dentro de Módulos de Controle Submarinos no ambiente submarino para que os mesmos atuem as válvulas do sistema submarino diretamente com esta, através de sinais elétricos vindo da superfície.

Figura 2.8: Módulo de Controle Submarino, a) Fase final de montagem; b) Finalizado e testado.



Fonte: Arquivo pessoal (2018).

As principais funções do Módulo de Controle Submarino são:

- Comportar o Módulo Eletrônico Submarino;
- Acionar os atuadores do equipamento no qual está instalado.
- Ser um módulo recuperável independente do equipamento no qual está instalado (exemplo, Árvore de Natal Molhada), em caso de falha;
- Fazer a interface elétrica entre o Módulo Eletrônico Submarino, a superfície e os sensores de campo.

Figura 2.9: Foto do interior de um módulo eletrônico submarino.



Fonte: Oil and Gas Online (2005).

O Módulo Eletrônico Submarino, Figuras 2.9 e 2.10, (*Subsea Electronic Module - SEM*), que fica dentro do SCM, tem as seguintes funções:

- Comunicar-se com a Cabine de Controle Mestre na superfície, transmitindo todos os dados obtidos dos sensores submarinos;
- E comandar as válvulas solenóides conforme sinal da superfície;
- Fornecer alimentação elétrica regulada para os sensores.

Figura 2.10: Ilustração de um módulo eletrônico submarino.



Fonte: Control Systems Brochure (2014).

2.3.3.1. Princípio de Funcionamento do Módulo de Controle Submarino

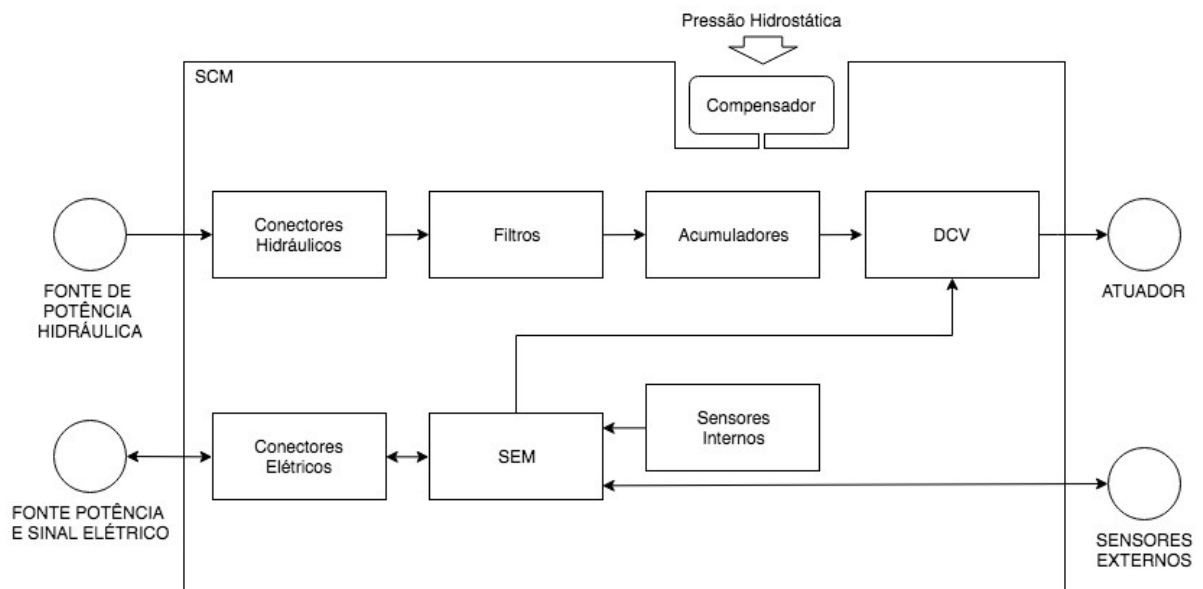
A principal função do Módulo de Controle Submarino (SCM) é acionar os atuadores do equipamento no qual está instalado, por exemplo, uma Árvore de Natal Molhada. Na prática esses atuadores são responsáveis por controlar a vazão de produção de óleo ou gás, ou ainda a segurança do meio ambiente e também da unidade de produção que recebe o óleo ou gás extraído.

Para exemplificar o funcionamento será usado o caso de acionamento da válvula mestre de produção (VMP). O processo se inicia na superfície onde a estação de controle mestre (Master Control Station - MCS) que possui uma interface para o operador envia o sinal de abertura da válvula. O SCM que está no leito marinho, já instalado e comissionado, recebe potência elétrica e potência hidráulica através do cabeamento umbilical o qual possui diversas linhas/vias elétricas e hidráulicas. Nessa condição o SCM ao receber o comando da superfície irá processar esse sinal e comandar as placas solenóides a energizar as válvulas direcionais de controle (DCV - *Directional Control Valve*). Ao energizar as DCVs, o fluido que está sendo pressurizado nos acumuladores dentro do SCM é liberado para pressurizar o atuador

VMP da ANM, acionando a válvula e abrindo a passagem de fluido do poço para a superfície.

A Figura 2.11 apresenta um diagrama que ilustra como os componentes mais importantes do módulo submarino estão conectados, desde o fornecimento de potência hidráulica e elétrica até os atuadores da ANM. No diagrama podemos observar o compensador que atua para equilibrar a pressão interna do SCM que é preenchido com óleo dielétrico. Essa compensação possibilita que a carcaça do SCM seja muito mais leve, e que a pressão sobre os componentes não sejam elevadas o que necessitaria de peças muito mais robustas.

Figura 2.11: Diagrama simplificado de um Módulo de Control Submarino.



Fonte: Autor (2018).

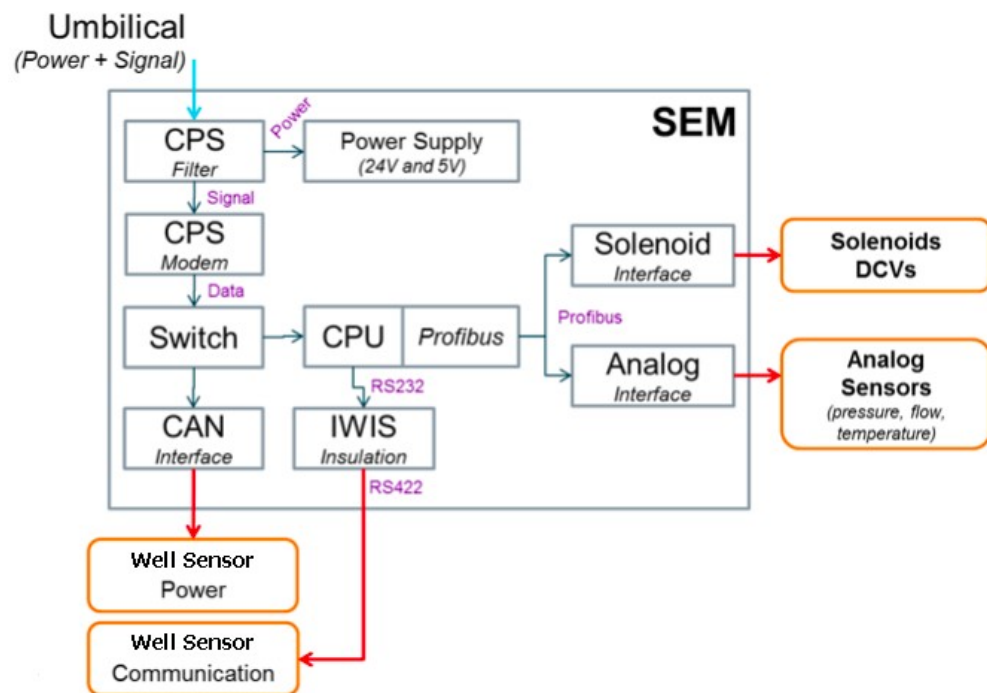
O módulo de controle submarino recebe duas linhas de baixa pressão redundantes e duas linhas de alta pressão redundantes. A partir dessas quatro linhas, o Módulo de Controle Submarino pode acionar dezenas de funções (um ou mais atuadores em paralelo) no equipamento, dependendo das válvulas direcionais solenóides que são abertas (eletronicamente). Além das linhas, a SEM e as DCVs possuem redundâncias uma vez que são componentes essenciais para a execução das suas funções primárias.

2.3.3.2. Módulo Eletrônico Submarino

Na arquitetura tradicional, o módulo eletrônico submarino (SEM) possui todas suas partes dentro de um único módulo que mantém a eletrônica protegida do ambiente externo, imersa em gás à pressão próxima da atmosférica.

A SEM (Figuras 2.9 e 2.10) se situa fisicamente dentro do módulo de controle submarino, que está internamente preenchido com óleo dielétrico. Quando o SCM está submerso no mar, o óleo tem sua pressão equalizada com a pressão externa (pressão hidrostática no leito marinho) através de uma membrana que separa os dois meios (óleo dielétrico e água do mar), conforme Figura 2.11.

Figura 2.12: Diagrama simplificado de um módulo eletrônico submarino.



Fonte: Autor (2018).

A SEM é a central de processamento do SCM, onde potência elétrica e sinais são demodulados e tratados para permitir o controle do sistema de produção submarino. A Figura 2.12 apresenta de forma simplificada os principais módulos internos da SEM. O módulo CPS executa a demodulação do sinal e potência, enviando a potência para o módulo de potência que gera tensão regulada para os sensores e placas internas. A porção de dados do sinal recebido é filtrado e transmitido para o processador o qual é programado para enviar os comandos de

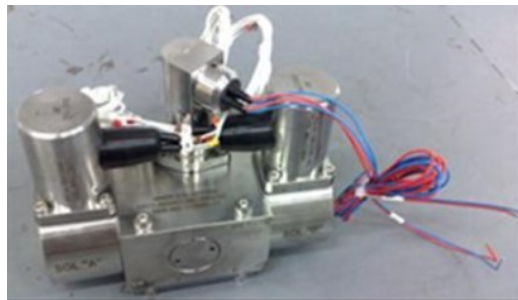
abertura e fechamento das válvulas DCV, além de realizar a leitura dos sensores tanto do SCM quando da ANM. Adicionalmente, existem módulos para sensores especiais como os sensores de fundo de poço.

2.3.3.3. Válvula de Controle Solenóide

A válvula de controle direcional ou válvula de controle solenóide (DCV - *Directional Control Valve*, Figura 2.13) é amplamente utilizada para acionamento hidráulico e controle de sistemas hidráulicos.

O módulo de controle submarino estudado nesta pesquisa utiliza essa válvula para acionar os atuadores da árvore de natal molhada através de comandos elétricos.

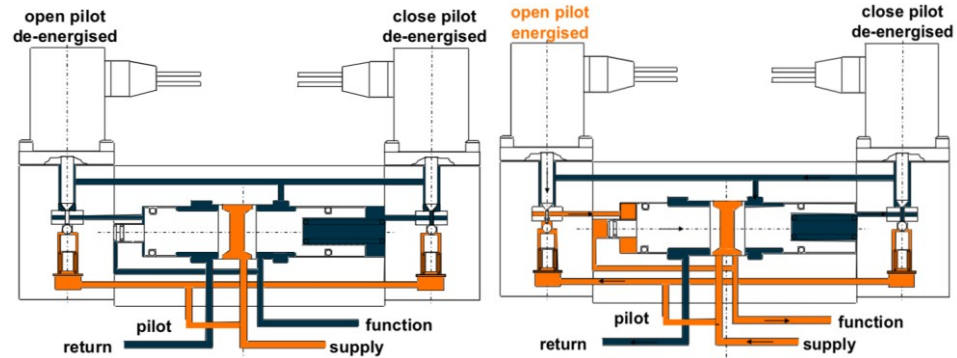
Figura 2.13: Válvula de controle direcional, DCV.



Fonte: Arquivo pessoal (2018).

Seu funcionamento consiste basicamente em acionar os elementos solenóides que possibilitam a abertura ou fechamento da linha de função. Quando o elemento solenóide é energizado e movimenta o pino que sela a passagem da linha piloto, em seguida o fluido pressuriza uma das câmaras da válvula e movimenta o cilindro hidráulico até o ponto que a linha de função permite a passagem do fluido (Figura 2.14). No processo inverso a solenóide oposta é energizada e a linha de retorno permite passagem.

Figura 2.14: Ilustração do funcionamento da válvula DCV.



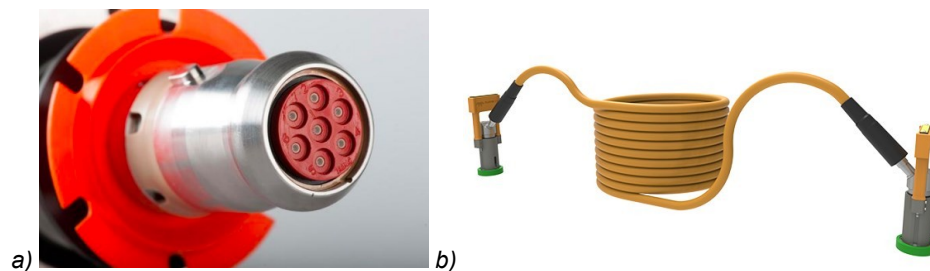
Fonte: Arquivo pessoal (2018).

2.3.3.4. Conectores de Potência e Sinal Elétrico

Os conectores de potência e sinal elétrico para aplicação submarina (Figura 2.15) possuem um sistema que permite a conexão e desconexão de forma segura mesmo quando o conector fêmea está energizado.

No módulo estudado o conector fêmea é montado no SCM e o conector macho é utilizado nos jumpers que realizam a conexão entre outros equipamentos e o SCM no fundo do mar.

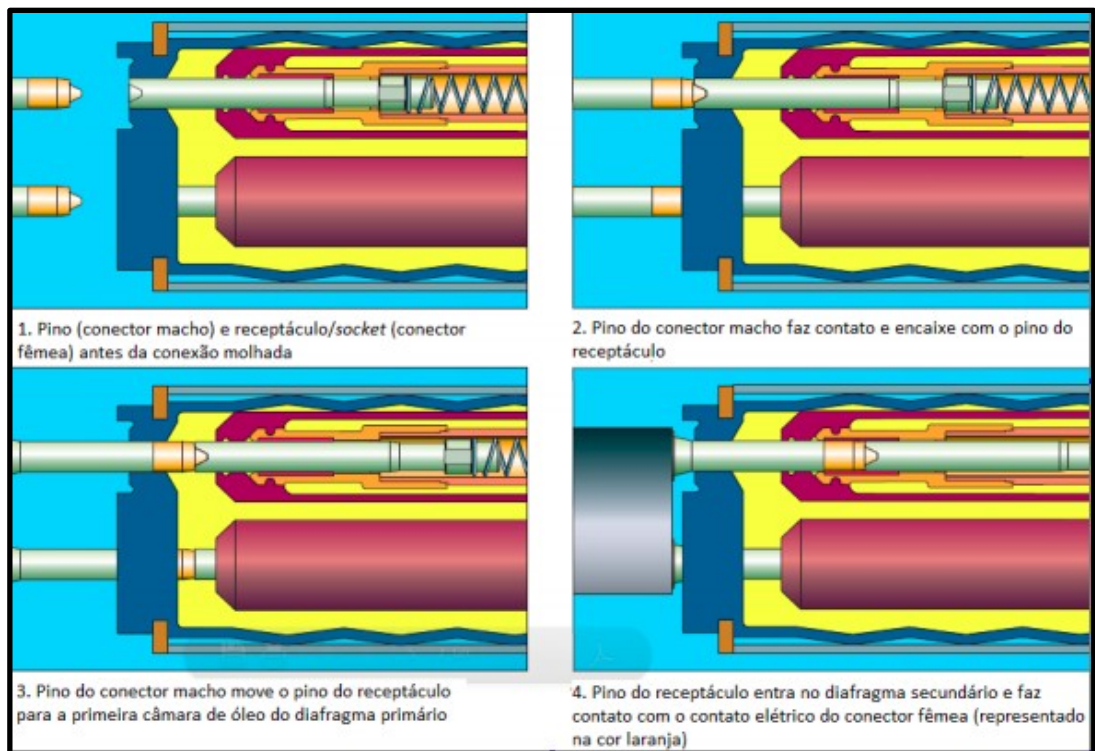
Figura 2.15: Conectores elétricos para aplicação submarina. a) Conector macho. b) Cabeamento elétrico com dois conectores fêmea.



Fonte: a) Siemens Subsea (2013), e b) Teledyne Marine (2014).

O mecanismo de funcionamento pode ser observado na Figura 2.16, e funciona com um sistema de diafragma. Esse tipo de conector possui uma câmara dentro de cada pino do conector fêmea que contém fluido dielétrico o que auxilia no isolamento.

Figura 2.16: Ilustração de como um par de conectores submarinos funciona.



Fonte: Siemens Subsea connectors, Digitron (2011).

2.3.3.5. Conectores Hidráulicos

Os conectores hidráulicos (Figura 2.17) utilizados no módulo de controle submarino são utilizados para, principalmente, interligar a fonte de potência hidráulica da superfície, e os atuadores da Árvore de Natal Molhada ao SCM.

Figura 2.17: Conectores hidráulicos.

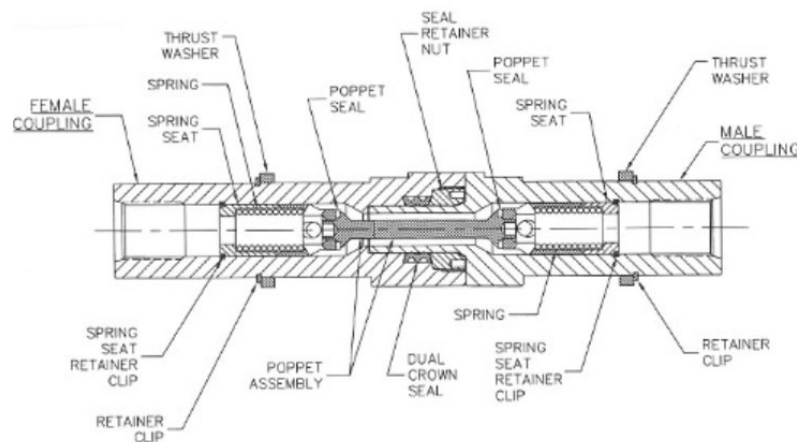


Fonte: Arquivo pessoal (2018).

Esses conectores precisam estar vedados quando não conectados, e esse mecanismo funciona através de um sistema de selos elastoméricos, *poppets* (peça de usinagem de precisão móvel) e molas, conforme Figura 2.18.

Existem diversos tipos de conectores hidráulicos, mas os mais utilizados para equipamentos submarinos são os sistemas *self-sealing* ou autosselante, que utilizam um mecanismo de mola e êmbolo que deslocam os selos elastoméricos quando acionados e permitem a passagem de fluido.

Figura 2.18: Desenho esquemático dos principais componentes dos conectores hidráulicos.



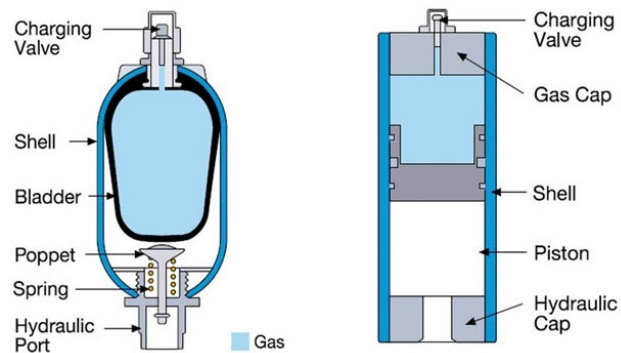
Fonte: Arquivo pessoal (2018).

2.3.3.6. Acumuladores Hidráulicos

Os acumuladores hidráulicos são componentes chave para o sistema hidráulico multiplexado. Esses componentes são um dos responsáveis pela redução do tempo de resposta entre o comando da superfície e o acionamento efetivo do atuador.

A função dos acumuladores é pressurizar o fluido hidráulico que vem da superfície dentro do invólucro do acumulador que possui uma certa capacidade de armazenamento. Com esse fluido pressurizado dentro do acumulador, quando o sistema é solicitado, ou seja, quando a válvula DCV é acionada e permite a passagem para o atuador do equipamento, o fluido é fornecido pelo acumulador. E quando o acumulador baixar sua pressão interna a certo ponto, a fonte de potência hidráulica da superfície repõe esse fluido utilizado.

Figura 2.19: Ilustração dos dois modelos de acumuladores utilizados em aplicações submarinas.



Fonte: Arquivo pessoal (2018).

Existem dois principais tipos de acumuladores, bexiga ou pistão. A diferença entre eles é o tipo de mecanismo utilizado para pressurizar o fluido armazenado. Ambos utilizam gás dentro de uma das câmaras para gerar a pressão necessária para comprimir o fluido armazenado.

2.4. RESUMO DO CAPÍTULO

O objeto da pesquisa nesse estudo será o Módulo de Controle Submarino, ou SCM, o qual foi descrito nesse capítulo como peça chave para a redução dos custos de investimento (CAPEX) e operacionais em campo de águas profundas e ultraprofundas. A fim de dar embasamento para os capítulos subsequentes foi detalhado o seu funcionamento e de seus principais componentes: que são o módulo eletrônico submarino, as válvulas de controle direcionais, os acumuladores e os conectores hidráulicos e elétricos.

A complexidade das operações nas quais esse equipamento é inserido torna o estudo de sua confiabilidade crucial para que o mesmo seja financeiramente viável.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será abordado o referencial teórico da engenharia de confiabilidade que incluem as ferramentas de confiabilidade quantitativa, Conceitos Fundamentais de Confiabilidade, a Análise de Dados de Vida e a Análise RAM. Além desses tópicos também será descrita de forma sucinta a metodologia utilizada pela Offshore and Onshore Reliability Data (OREDA) que serve como base de desempenho para equipamentos na indústria do óleo e gás.

3.1. CONCEITOS DE CONFIABILIDADE

Segundo Birolini (2007) em seu livro *Reliability Engineering Theory and Practice*, a confiabilidade é a característica de um item, expressada na forma de probabilidade de desempenhar uma função requerida sob dadas condições dentro de um intervalo de tempo definido. Do ponto de vista qualitativo, a confiabilidade pode ser descrita como a habilidade do item não falhar, ou permanecer em operação.

O estudo da confiabilidade quantitativa é fundamentado em métricas envolvendo o tempo até a falha de um dado item. Tais métricas permitem descrever e quantificar o comportamento dos dados de forma a caracterizar o desempenho do item monitorado, são algumas delas (Reliawiki, 2017):

- **Confiabilidade, $R(t)$** : Probabilidade do item funcionar até um determinado tempo “t”;
- **Probabilidade de Falha, $F(t)$** : Probabilidade do item falhar até um determinado tempo “t”;
- **Vida Média (Mean Time To Failure - MTTF)**: Tempo médio para uma falha ocorrer em um item, ou ainda para um equipamento reparável pode ser chamado de MTBF - Mean Time Between Failure;
- **Taxa de Falha $\lambda(t)$** : Probabilidade instantânea de um item falhar dado que este mesmo item não falhou até então.

Para que essas métricas agreguem valor a análise dos dados é fundamental que uma referência ou até mesmo uma base de dados seja utilizada para comparação a fim de gerar tomadas de decisão efetivas. Na indústria de petróleo e gás existe uma base de dados chamada OREDA, *Offshore and Onshore Reliability Data*, que possui

dados de falhas de equipamentos e componentes críticos no ciclo de vida de um poço de petróleo.

3.1.1. Confiabilidade de Sistemas

Barros Filho (2003) descreve um sistema da seguinte forma:

Entende-se por sistema um conjunto de subsistemas e componentes, combinados entre si de modo específico, correspondentes a dados arranjos físicos (Série, Paralelos, Compostos e Complexos), para atingir as funções operacionais desejadas, com custos, performances e Confiabilidade que satisfaçam as necessidades do usuário final (Barros Filho, 2013, p. 53).

Pensando então na confiabilidade de um sistema, estamos falando da confiabilidade de seus componentes e seus subsistemas, os quais interferem diretamente no desempenho do sistema dependendo da forma como são conectados, da qualidade da sua fabricação, instalação, etc.

Outro conceito importante de ser definido nesta etapa é o conceito de falha, de acordo com o dicionário Merriam-Webster (2018), falha é um estado de incapacidade de desempenhar uma função. Adaptando para a realidade industrial podemos dizer que o equipamento falhou, da seguinte forma, o equipamento entrou em um estado no qual não é possível desempenhar a sua função.

Segundo Birolini (2007), a confiabilidade de um sistema é calculada utilizando as métricas quantitativas de confiabilidade, como o tempo até falha, e aplicando a análise de dados de vida. Esse conceito é utilizado para os subsistemas e componentes, o que diferencia cada um deles é a sua função.

Usando o SCM como um sistema exemplo, podemos dizer que a função do SCM é acionar os atuadores da ANM. Ou seja, qualquer tipo de falha que incorra na inabilidade de acionar os atuadores será considerada como uma falha do SCM. Contudo, podem haver falhas que não impactam a função do sistema, como uma falha de um sensor de pressão que monitora uma linha hidráulica interna do SCM. Conforme discutido por Moubray (2000) componentes, subsistemas e sistemas possuem funções diferentes e a falha em desempenhar qualquer uma delas pode impactar desde a confiabilidade do componente até a falha do sistema como um todo.

3.1.2. Diagrama de Blocos de Confiabilidade

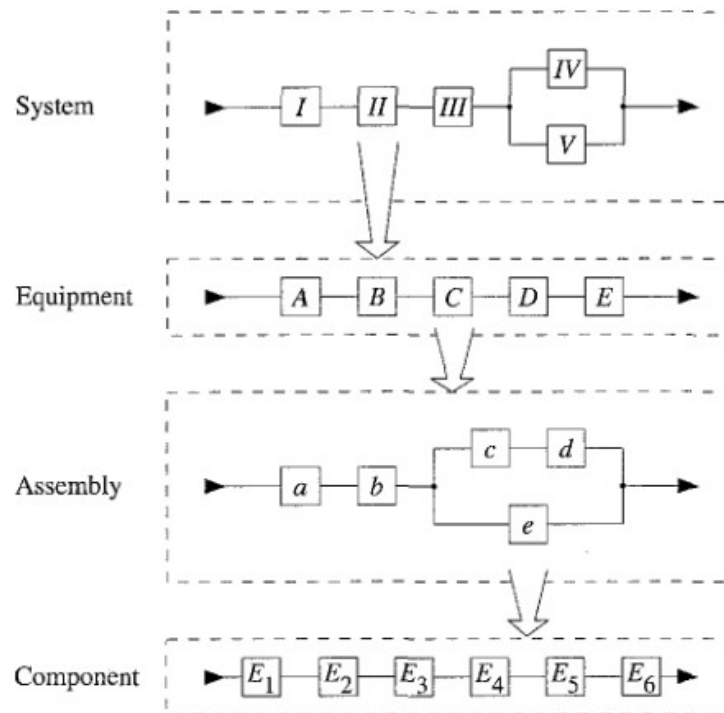
Conforme Pallerosi (2001) sistemas podem ser representados por um diagrama de blocos, (RBD – *Reliability Block Diagram*) no qual os componentes do sistema estão conectados entre si nas várias configurações possíveis. Entretanto, a relação entre o sistema e sua representação por diagramas de blocos deve ser bem definida, antes de ser aplicada uma técnica qualquer para a avaliação da confiabilidade. Para criar esse modelo de representação de um sistema físico não necessariamente implica que a mesma estrutura topológica, mas dependerá de como os componentes são solicitados para desempenhar a função do sistema.

O arranjo de componentes ou elementos pode assumir várias formas, cada qual com efeitos específicos na confiabilidade do sistema. Pallerosi e outros autores apresentam três configurações fundamentais:

- Estrutura série;
- Estrutura paralela;
- Estrutura mista.

Dias (1996) em seu trabalho nomeia as estruturas citadas acima de “arranjos funcionais” (Dias, 1996, p. 37), uma vez que se trata de uma representação de um conjunto de itens de um sistema agrupados para desempenhar uma função específica. Os arranjos podem ser criados a partir do fluxo de energia, da sequência de operações requeridas em um processo de fabricação, ou da sequência de decisões tomadas pelo próprio equipamento.

Figura 3.1: Diagrama de blocos com quatro níveis de profundidade (Sistema, Equipamento, Conjunto e Componente).



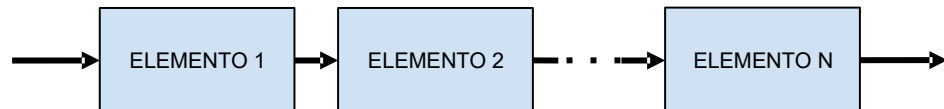
Fonte: Birolini (2007).

Em seu livro Birolini (2007) ilustra um sistema em quatro níveis começando pelo sistema, em seguida, equipamento, então, conjunto e por fim, componente. Essa ilustração aplica um conceito onde cada elemento do sistema pode ser composto por uma série de outros elementos. A ferramenta de diagrama de blocos pode ser aplicada desde equipamentos como um celular ou um computador, até fábricas ou usinas. Em escalas maiores como em usinas petroquímicas ou campo de produção de petróleo, por exemplo, podemos construir um diagrama de blocos desde o mais alto nível com elementos com milhares de metros quadrados até peças e componentes com centímetros de comprimento. Contudo, para que isso seja possível é necessário que exista capacidade de monitorar cada um desses elementos de modo que as métricas de confiabilidade quantitativa sejam determinados.

3.1.2.1. Sistemas em Série

De acordo com Pallerosi (2005) na configuração em série, a falha de qualquer componente resulta na falha de todo sistema. Isto significa que, todas as unidades em um sistema em série devem funcionar para que o sistema funcione.

Figura 3.2: Diagrama de blocos de um sistema série.



Fonte: Autor (2018).

Conforme Pallerosi (2000), considerando a independência entre os elementos do sistema o cálculo da confiabilidade da configuração série é dada pelo produto da confiabilidade de todos os elementos que a compõe:

$$R_S(t) = R_{E1}(t) \cdot R_{E2}(t) \cdot \dots \cdot R_{En}(t) \quad (1)$$

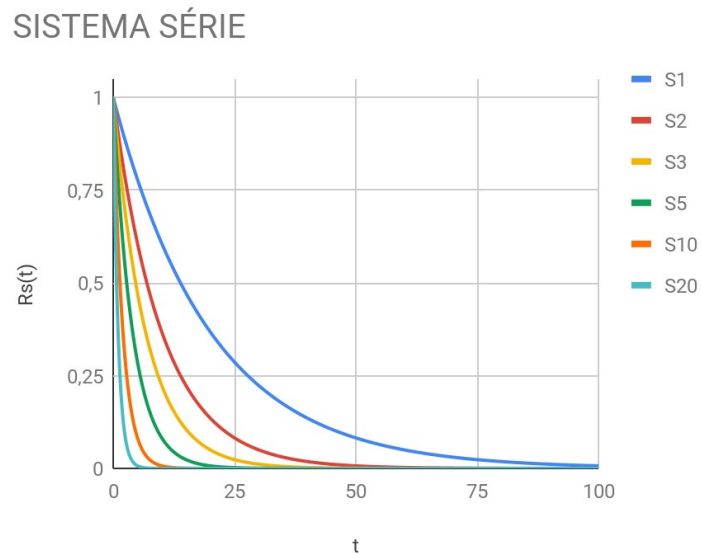
$$R_S(t) = \prod_{i=1}^n R_{Ei}(t) \quad (2)$$

Supondo que os elementos sejam idênticos :

$$R_S(t) = R_{E1}(t)^n \quad (3)$$

Em outras palavras, para um sistema em série puro, a confiabilidade do sistema é igual ao produto da confiabilidade dos componentes que o constitui. Dessa forma a confiabilidade do sistema depende diretamente da confiabilidade de cada um dos elementos, mesmo que o sistema possua (n-1) elementos com confiabilidade próxima de 1 e um único elemento com confiabilidade de próxima de zero a probabilidade desse sistema continuar operando será muito próxima de zero. Ou seja, a confiabilidade do sistema série será sempre menor que a do elemento menos confiável (Pallerosi, 2000, p. 55).

Figura 3.3: Gráfico exemplo com 6 arranjos diferentes com 1, 2, 3, 5, 10 e 20 elementos em série.



Fonte: Autor (2018).

Na Figura 3.3 foi reproduzido o conceito apresentado por Pallerosi (2000) demonstrando o efeito de um arranjo em série com elementos idênticos, todos independentes, com a mesma taxa de falha e com a mesma distribuição de probabilidade de falha (exponencial). Conforme aumentamos o número de elementos em série a confiabilidade cai devido ao fato que o sistema depende de todos os elementos estarem em pleno funcionamento para que o sistema continue operando.

3.1.2.2. Sistemas em Paralelo

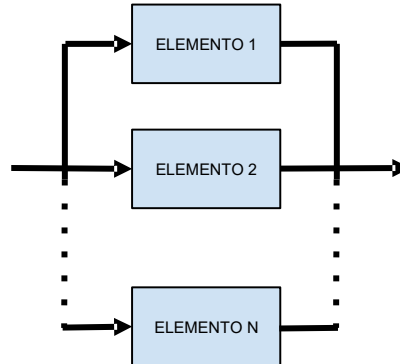
Na configuração paralela, segundo Pallerosi (2000), a falha do sistema apenas ocorre se todos os elementos falharem. Ou seja, enquanto houver um dos elementos do arranjo funcionando o sistema continuará operando. Elementos em paralelo são chamados também de redundâncias em algumas literaturas e abordaremos esse tópico a seguir. Na prática a redundância tem a intenção de aumentar a confiabilidade do sistema, tornando-o menos suscetível a paradas não planejadas.

Em seu trabalho, Barros Filho (2007) comenta:

De acordo com Pallerosi (2005) a redundância é uma expressão elementar da natureza; os seres humanos possuem dois pares de membros, narinas, olhos, etc. Todas estas redundâncias são recursos para o aumento da confiabilidade do sistema "ser humano". Portanto, quando um projetista aplica paralelismos em sistemas técnicos está trabalhando com

mecanismos de redundância para o aumento da sua confiabilidade (Pallerosi, 2005 apud Barros Filho, 2007, p. 34).

Figura 3.4: Diagrama de blocos de um sistema paralelo.



Fonte: Autor (2018).

Segundo Pallerosi (2005) e Dias (1996), para o cálculo da confiabilidade de um sistema paralelo devemos calcular a probabilidade de que pelo menos um dos seus elementos opere sem falhas, ou seja, o complemento do produto das probabilidades de falha de cada um dos elementos que compõe o sistema.

$$R_P(t) = 1 - (1 - R_{E1}(t)) \cdot (1 - R_{E2}(t)) \cdot \dots \cdot (1 - R_{En}(t)) \quad (4)$$

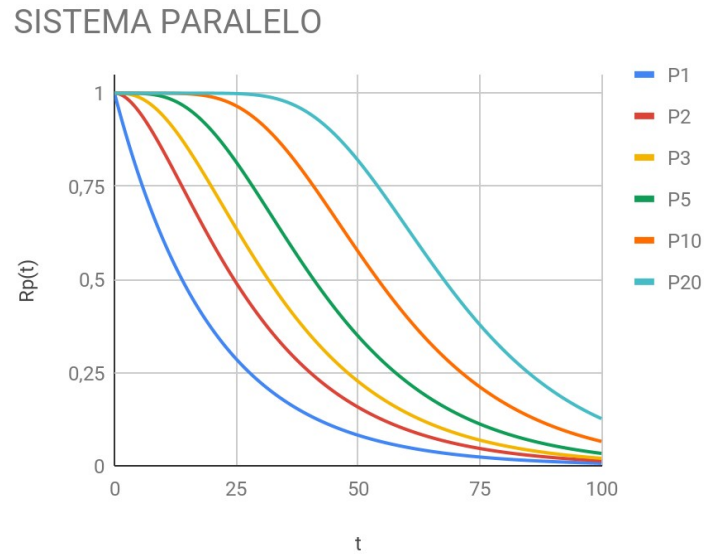
$$R_P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_{Ei}(t)) \quad (5)$$

Supondo que os elementos sejam idênticos :

$$R_P(t) = 1 - (1 - R_{E1}(t))^n \quad (6)$$

Em outras palavras um sistema paralelo puro não depende unicamente de um elemento, o que o torna a confiabilidade mais robusto quando comparado a um sistema em série com elementos de mesma confiabilidade. Os múltiplos caminhos que possibilitam continuar desempenhando a função do sistema é o que permite essa robustez, e com frequência esse arranjo é utilizado para aumentar a confiabilidade do sistema ao se aplicar uma redundância em um módulo específico que possui uma confiabilidade menor que o restante dos elementos do sistema.

Figura 3.5: Gráfico exemplo com 6 arranjos diferentes com 1, 2, 3, 5, 10 e 20 elementos em paralelo.



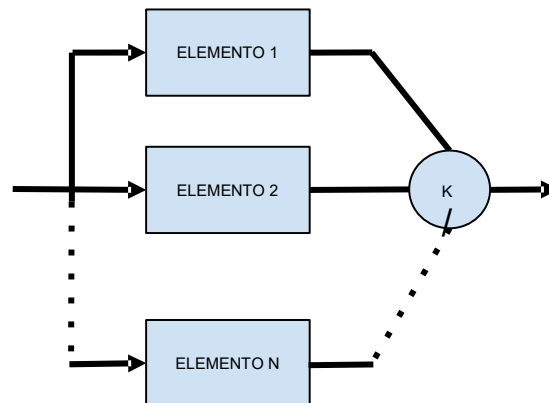
Fonte: Autor, (2018).

Segundo Pallerosi (2005) e aplicando a fórmula 6 pode-se observar na Figura 3.5 a demonstração do efeito de um arranjo em paralelo com elementos idênticos, todos independentes, com a mesma taxa de falha e com a mesma distribuição de probabilidade de falha (exponencial). Conforme aumentamos o número de elementos em paralelo a confiabilidade aumenta devido ao fato de que o sistema precisa que apenas um dentre os N elementos esteja em pleno funcionamento para que o sistema continue operando.

3.1.2.3. Sistemas K-em-N

Segundo Pallerosi (2001) um sistema K-em-N é a representação genérica dos dois arranjos anteriores, onde é necessário que um grupo (k) de elementos estejam plenamente funcionais para que o sistema composto por um grupo (n) de elementos continue operando. O sistema série é um dos extremos do sistema k-em-n onde k e n são iguais. O outro extremo é o sistema paralelo no qual k é igual a 1 e n pode ser qualquer número maior do que 1.

Figura 3.6: Diagrama de blocos em sistema k-em-n.



Fonte: Autor, (2018).

Pallerosi (2001) também descreve o cálculo da confiabilidade de um sistema k-em-n onde calcula-se a probabilidade utilizando a combinação entre os elementos.

$$R_k(t) = \sum_{i=k}^n \frac{n!}{(n-i)! \cdot i!} \cdot R_{Ei}(t)^i \cdot 1 - R_{Ei}(t)^{n-i} \quad (7)$$

Como é possível de observar tanto o sistema K-em-N quanto o sistema paralelo tem implícito a redundância que é basicamente a forma como o sistema pode continuar operando, mesmo com elementos em falha.

3.1.3. Redundância

Guzzon (2009) disserta sobre redundâncias:

A adição de redundâncias no sistema faz com que este se torne mais confiável à medida que diminui a probabilidade de falha durante um determinado período de tempo. Como a adição de redundâncias no sistema implica na adição de custos, normalmente são feitas análises de viabilidade econômica, a fim de determinar se o real incremento na confiabilidade condiz com o incremento no custo de operação que se terá (aquisição de equipamentos, custos com energia, entre outros) (SMITH, 2001 apud Guzzon, 2009).

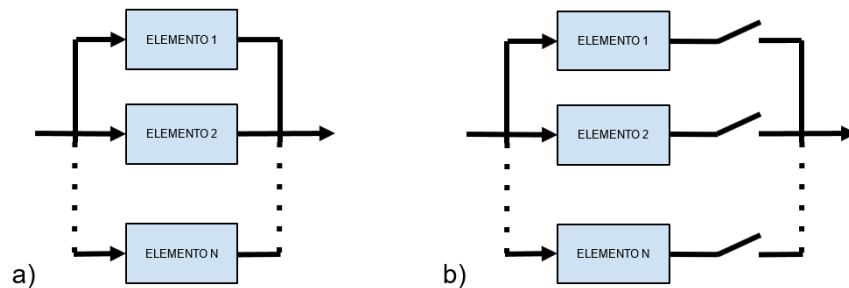
Conforme Smith (2001) a redundância é um caminho alternativo para que o sistema continue disponível mesmo que haja uma falha em um determinado ponto do sistema. Essa descrição lembra muito um sistema paralelo, e é exatamente como a redundância é utilizada na prática.

Existem 2 tipos de redundâncias:

- Redundâncias ativas (simultâneas)
- Redundâncias passivas (standby, ou espera)

Nas redundâncias ativas os elementos estão conectados em paralelo e operando simultaneamente; nas passivas os elementos também estão dispostos paralelamente, porém ficam em espera até que um chaveamento os coloque em operação (Figura 3.7).

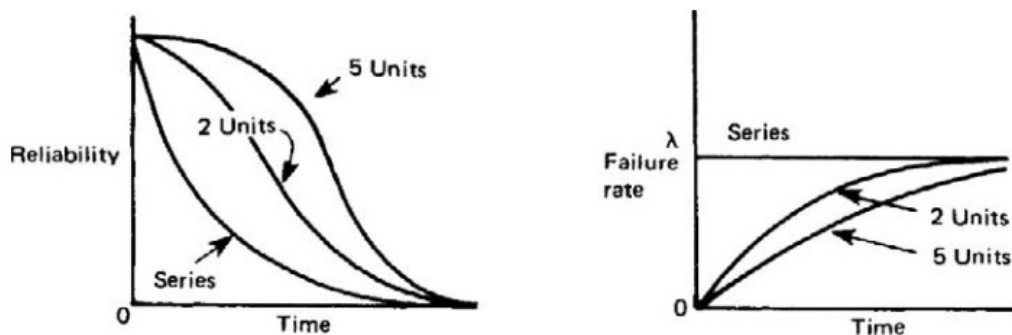
Figura 3.7: a) Representação de um Sistema com redundância ativa; b) e Sistema com redundância passiva.



Fonte: Autor, (2018).

Na configuração de redundância ativa conforme descrito acima e ilustrado na Figura 3.7 (a) os elementos estão operando simultaneamente, e o efeito que a redundância gera no sistema pode ser observado na Figura 3.8 onde o sistema se torna mais confiável quanto mais redundâncias são implementadas.

Figura 3.8: Efeito da redundância na confiabilidade e taxa de falha de um sistema.

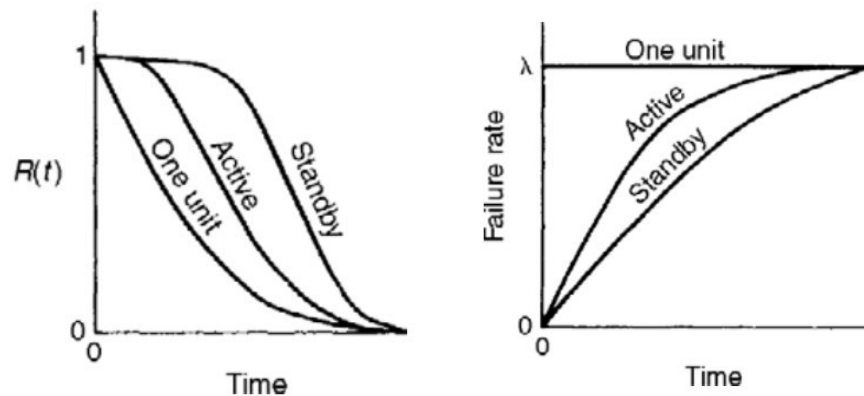


Fonte: Smith (2001).

De acordo com Smith (2001) a configuração passiva por sua vez só entra em operação quando uma falha é detectada, e o mecanismo de acionamento coloca o

elemento em redundância para operar. Uma das vantagens desta configuração é o fato do elemento redundante não estar operando o que faz com que sua confiabilidade não seja tão afetada quanto se estivesse operando. Por outro lado, existe a desvantagem de depender da confiabilidade dos componentes de monitoramento e chaveamento.

Figura 3.9: Comparação entre redundância Passiva e Ativa.



Fonte: Smith (2001).

Uma característica relevante na configuração ativa é a possibilidade de sobrecarga dos elementos redundantes uma vez que a carga era distribuída entre os N elementos antes que houvesse a falha, contudo mesmo com essa hipótese essa configuração é a mais eficiente uma vez que o elemento redundante já está operando e assume a função do elemento falhado imediatamente após a falha (Pallerosi, 2005). Ainda segundo o autor custo é um dos grandes fatores para o uso de redundâncias pois a implementação de um item idêntico no sistema pode impactar consideravelmente a viabilidade econômica do projeto. Por esse motivo, os custos de lucro cessante e manutenção corretiva devem ser levantados da maneira mais precisa possível a fim de garantir um equilíbrio entre confiabilidade e custo.

Conforme observado na Figura 3.9, pode-se concluir que a redundância passiva pode garantir uma confiabilidade maior do sistema. Todavia, a dependência do mecanismo que coloca a redundância em operação e os modos de falha que podem atuar sobre o elemento redundante enquanto está fora de operação podem afetar a operação do sistema. Do outro lado, a redundância ativa tem seus desafios referentes ao fato de sofrer degradação durante sua vida útil, e também por ser muito difícil que o elemento redundante seja completamente independente, ou seja, uma

falha que afeta o elemento principal pode afetar também o elemento redundante (Pallerosi, 2005).

3.1.4. Sistemas Reparáveis, Não-reparáveis e LRU

Um conceito importante de ser definido nesta etapa é o conceito de falha, de acordo com o dicionário Merriam-Webster, falha é um estado de incapacidade de desempenhar uma função (Merriam, 2018).

Essa definição de falha é importante para descrever três conceitos sobre confiabilidade de sistemas: Sistemas reparáveis, Sistemas não-reparáveis e Unidade Substituível em Linha (*Line Replaceable Unit* - LRU).

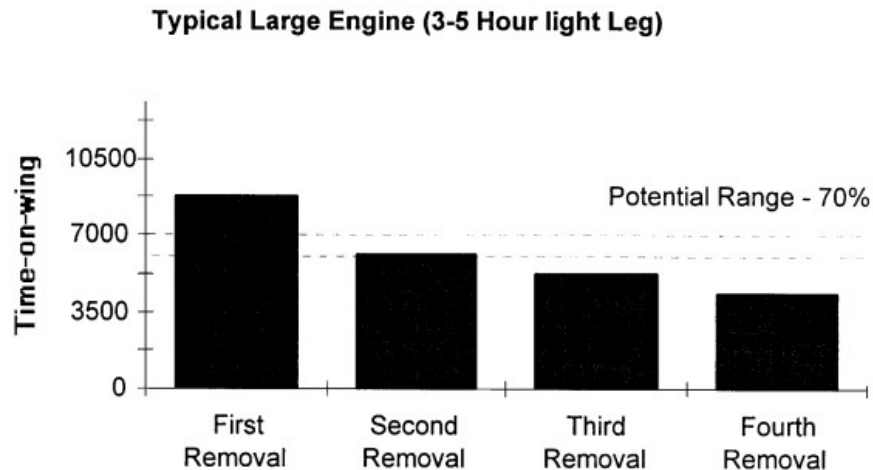
Para descrever esses três elementos vamos considerar que um sistema e/ou um elemento pode ser representado como um único bloco. Quando falamos em Sistemas ou elementos não-reparáveis estamos falando de itens não podem ser reparados, ou seja precisam ser substituídos para que o sistema do nível superior continue desempenhando sua função, por exemplo, uma lâmpada. Sistemas ou elementos reparáveis podem ter seu estado alterado, de falha, para em operação, podendo voltar ao mesmo nível de confiabilidade da instalação ou não, por exemplo, o pneu de um veículo.

Segundo CCPS (1998) a maioria dos sistemas são reparáveis porém peças/componentes não são. Essa afirmação ajuda a entender que um sistema pode ser considerado reparável, mesmo que todos os seus subsistemas, componentes e peças internas sejam não-reparáveis. Isso se deve ao fato que na visão de um nível superior o sistema não necessita ser substituído, mas sim reparado o que pode envolver a substituição de um componente interno. Dessa forma o sistema ficará indisponível por um determinado tempo até que possa ser colocado em operação novamente, por exemplo, um automóvel com o farol dianteiro danificado.

O conceito de sistema reparável também deve levar em consideração o fato que um processo de reparo ou manutenção não é perfeito, ou seja, a probabilidade de que o sistema retorne ao mesmo nível de confiabilidade que se encontrava antes da falha ter ocorrido é baixo. Segundo Kleinert (1990) em seu estudo sobre turbinas de aeronaves a deterioração da confiabilidade mesmo após uma manutenção completa tem efeitos consideráveis no desempenho de um elemento crítico. Outros estudos apresentam diferentes taxas de deterioração o que nos leva a concluir que

inúmeros fatores contribuem para esse efeito, e que inclusive não podemos descartar, por mais que seja pequena, a probabilidade de que existam reparos que regeneram a confiabilidade do elemento ao mesmo nível anterior a falha.

Figura 3.10: Deterioração no tempo de utilização antes de remoção para reparo de turbinas de aeronaves.



Fonte: Kleinert (1990).

A Figura 3.10 apresenta o impacto da deterioração em termos de tempo de utilização das turbinas após cada reparo completo.

Um conceito importante sobre sistemas reparáveis é chamado de LRU. LRU é uma sigla de um termo em inglês *Line Replaceable Unit*, que em português, Unidade Substituível em Linha. Esse conceito é utilizado para identificar o menor nível de componente que pode ser substituído sem a necessidade de substituir um nível mais alto do sistema. Por exemplo, um veículo com uma das engrenagens da caixa de câmbio danificada. Se for possível substituir apenas a engrenagem danificada, a engrenagem pode ser identificada como LRU; caso contrário, a caixa de câmbio por inteiro precise ser substituída então a caixa de câmbio será identificada como LRU. A origem do termo vem da possibilidade de realizar uma substituição de um componente na linha de produção.

3.2. ANÁLISE DE DADOS DE VIDA

A modelagem da vida de um item trata-se do tempo que este opera antes de entrar em falha. Estes tempos de vida podem ser medidos em horas, dias, quilômetros, ciclos ou qualquer outra métrica com a qual a vida ou a aplicação possa ser medida. A análise posterior destes dados e a estimativa de vida são conhecidas como análise de dados de vida (Calixto, 2016).

A análise de dados de vida consiste, portanto, em utilizar o modelamento de uma distribuição estatística que se ajusta à amostra dos dados coletados. A distribuição parametrizada para os dados pode então ser usada para estimar as métricas de confiabilidade.

Para aplicar a análise de dados de vida será necessário:

- Coletar os dados de vida do item;
- Selecionar uma distribuição estatística que corresponda aos dados e modele a vida do produto;
- Estimar os parâmetros que se ajustem a distribuição aos dados.

3.2.1. Classificação dos Dados de Vida

Em análise de dados de vida busca-se utilizar todos os dados disponíveis, porém existem dados que podem incluir incertezas como o momento exato de quando a falha ocorreu (Reliawiki, 2017).

Segundo Reliawiki (2017) dados de vida podem, entretanto, ser separados em 2 tipos:

- Dados completos:

Dados completos significam que o valor de cada unidade da amostra é observado ou conhecido. Por exemplo, se fosse computada a média das notas de 10 alunos, dados completos iriam consistir em conhecer a nota de cada estudante. Igualmente no caso de análise de dados de vida, nosso conjunto de dados (se completo) seria composto por tempos até a falha de todas as unidades de nossa amostra. Por exemplo, se fossem testadas cinco unidades e todas elas falhassem (e

seus tempos até a falha fossem registrados), haveria então informações completas como o tempo de cada falha na amostra.

Figura 3.11: Ilustração de dados completos.



Fonte: Reliawiki (2017).

- Dados censurados:

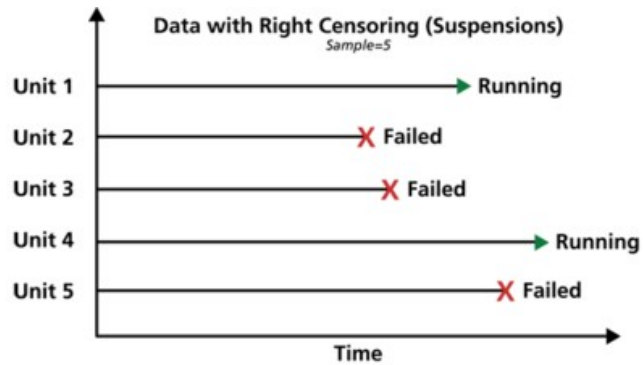
Em muitos casos, todas as unidades na mesma amostra podem não ter falhado (o evento de interesse não foi observado) ou os tempos exatos até a falha de todas as unidades não são conhecidos. Este tipo de dados é comumente chamado de dados censurados.

Existem três tipos de dados censurados:

- Censura à direita:

O caso mais comum de censura se refere aos dados censurados à direita, ou dados suspensos. No caso dos dados de vida, estes conjuntos de dados são compostos de unidades que não falharam. Por exemplo, se foram testadas cinco unidades e somente três falharam ao final do teste, seriam dados censurados à direita (ou dados suspensos) as duas unidades que não falharam. O termo censura à direita significa que o evento de interesse (o tempo até a falha) está à direita do instante de observação dos dados. Em outras palavras, se as unidades se mantêm em operação, a falha poderia ocorrer algum tempo após o instante de observação dos dados (ou à direita na escala do tempo).

Figura 3.12: Ilustração de dados suspensos, ou censurados à direita.

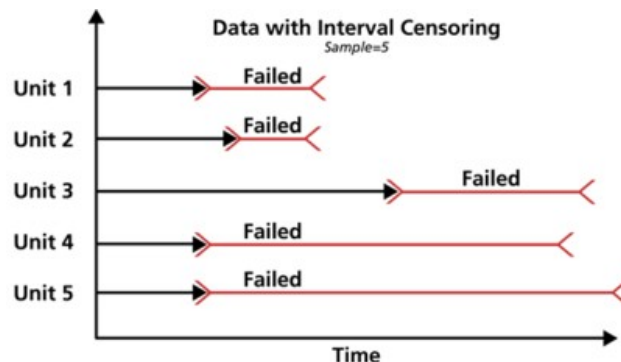


Fonte: Reliawiki (2017).

- Censura no intervalo:

O segundo tipo de censura é comumente chamado de dados censurados em intervalo. Dados censurados em intervalo reflete incerteza nos tempos exatos que as unidades falharam dentro de um intervalo. Este tipo de dados frequentemente vem de testes ou situações onde os objetos de interesse não são constantemente monitorados. Por exemplo, ao realizar um teste em cinco unidades e inspecioná-las a cada 100 horas, somente sabe-se que a unidade falhou ou não falhou entre as inspeções. Especificamente, ao inspecionar certa unidade com 100 horas, encontrá-la operando, e então realizar outra inspeção com 200 horas e encontrar que a unidade não está mais operando, então a única informação que se tem é que a unidade falhou em algum tempo no intervalo entre 100 e 200 horas. Este tipo de dados censurados é chamado também de *dados de inspeção* por alguns autores.

Figura 3.13: Ilustração de dados de inspeção, ou dados censurados em intervalos.

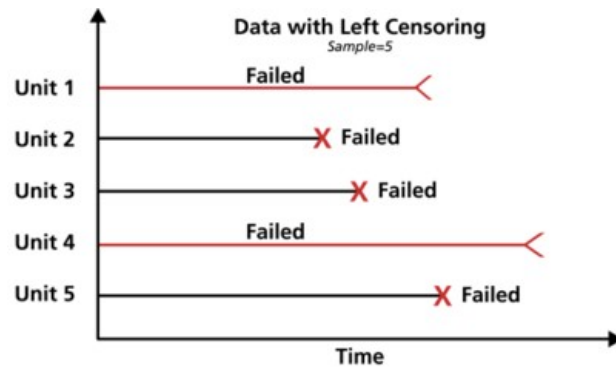


Fonte: Reliawiki (2017).

- Censura à esquerda:

O terceiro tipo de censura é similar à censura de intervalo e é chamado de dados censurados à esquerda. Nos dados censurados à esquerda, o que se sabe é que o tempo da falha ocorreu antes de um tempo específico. Por exemplo, sabe-se que determinada unidade falhou algum tempo antes de 100 horas, mas não se sabe exatamente quando. Em outras palavras, a falha pode ter ocorrido num tempo entre 0 e 100 horas. Isto é idêntico aos dados censurados em intervalo, no casos em que o tempo de início para o intervalo é zero.

Figura 3.14: Ilustração de dados censurados à esquerda.



Fonte: Reliawiki (2017).

3.2.2. Modelos de Distribuição de Dados de Vida

De acordo com Calixto (2016) distribuições estatísticas são formulações que visam modelar um determinado conjunto de dados. Desde que exista um conjunto de dados classificados que contenham informações sobre a vida de um equipamento ou componente, é possível utilizar uma das várias distribuições de probabilidade para representar uma população com base na amostra de dados utilizada.

A função de densidade de probabilidade (pdf) é uma função matemática que descreve a distribuição. As distribuições de probabilidade estatística mais utilizadas para representar dados de vida (ou sobrevivência) na área de manutenção e confiabilidade são Exponencial, Lognormal e Weibull, suas pdfs estão descritas a seguir.

- Exponencial:

$$p(t, \lambda) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (8)$$

- Lognormal:

$$p(t, \sigma, \mu) = \frac{1}{t} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln(t) - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (9)$$

- Weibull:

$$p(t, \beta, \gamma, \eta) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \frac{t - \gamma}{\eta}^{\beta - 1} \cdot e^{-\frac{t - \gamma}{\eta}^\beta} \quad (10)$$

Ainda segundo Calixto (2016) os modelos apresentados acima são chamados de paramétricos, onde um conjunto de parâmetros molda a distribuição. Dentre os modelos citados a distribuição Weibull será detalhada nesta seção, iniciando pelos parâmetros que a compõe:

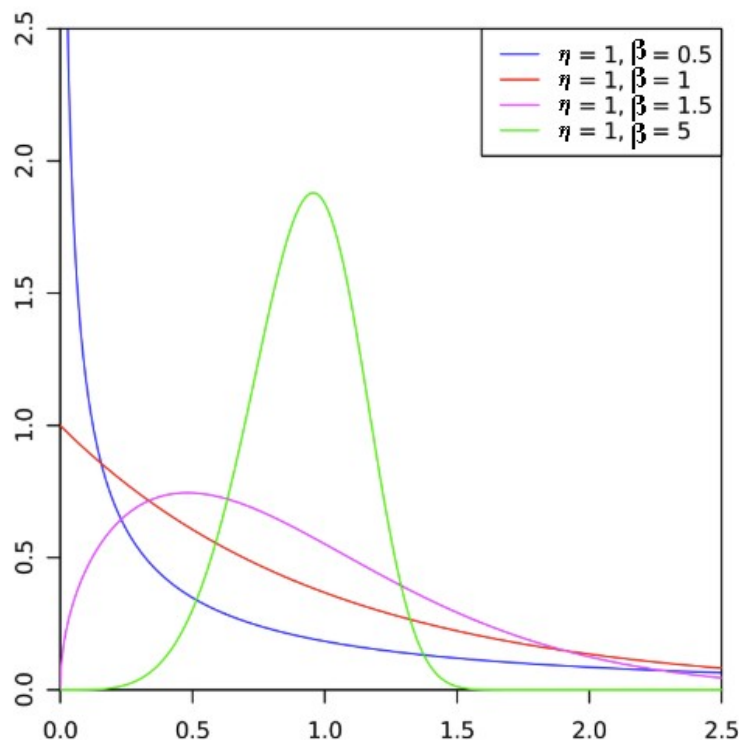
- η (eta) é o parâmetro de escala ou vida característica, que define onde a maior parte da distribuição falha. Possui a mesma unidade de t;
- β (beta) é o parâmetro de forma ou inclinação, que define a forma da distribuição, sendo um número adimensional;
- γ (gama) é o parâmetro de localização ou vida livre de falha, que define a localização da distribuição no tempo, ou seja, representa um deslocamento no tempo, trasladando o início da distribuição para um valor diferente de zero. Possui a mesma unidade de t.

A Figura 3.15 apresenta o gráfico que representa a distribuição Weibull de dois parâmetros, onde η é constante e β varia de 0,5 a 5. Pode-se notar a ampla capacidade de representação da distribuição Weibull, motivo pelo qual essa distribuição é utilizada vastamente em estudos de confiabilidade.

Considerando que "t" é interpretado como "tempo até falha" a distribuição Weibull representa a distribuição de probabilidade de um componente falhar em um dado intervalo de tempo. O parâmetro de forma, β , é aplicado como um exponencial o que implica em 3 diferentes efeitos nos resultados da distribuição (ver Figura 3.15):

- $\beta < 1$ indica que a taxa de falha diminui com o tempo. Esse efeito ocorre em amostras de tempo até falha que tem predominantemente dados de falhas prematuras, ou "*infant failures*". Componentes que comumente apresentam essa característica são componentes eletrônicos;
- $\beta = 1$ indica que a taxa de falha se mantém constante no tempo. Esse comportamento sugere que os dados utilizados para construir a distribuição possuem característica aleatória;
- $\beta > 1$ indica que a taxa de falha aumenta com o passar do tempo. Esse comportamento sugere um processo de "envelhecimento" do componente, conforme o tempo passa a probabilidade de falha aumenta.

Figura 3.15: Distribuição Weibull com dois parâmetros, variando β de 0,5 a 5.



Fonte: Autor (2018).

Além da função densidade de probabilidade, existem outras formulações que possuem aplicação na análise de dados de vida as quais ajudam a calcular fatores fundamentais sobre a Confiabilidade do sistema.

A *Cumulative Density Function* (CDF) possibilita o cálculo da probabilidade de falha até um momento "t" de interesse. Essa equação é resultado da integral no tempo

da *Probability Density Function* (PDF), que acaba gerando um função que soma todas as probabilidades de falhas instantâneas desde 0 até o tempo de interesse “t”.

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t-\gamma}{\eta} \beta} \quad (11)$$

A função de Confiabilidade R(t) é o complemento da função CDF, a qual descreve a probabilidade de falha acumulada. Ou seja, através da R(t) calcula-se a probabilidade do sistema continuar a operar até o tempo “t”.

$$R(t) = e^{-\frac{t-\gamma}{\eta} \beta} \quad (12)$$

A função Quantil ou também chamada de vida BX, possibilita calcular qual é o tempo de vida esperado até que “x”% da população venha a falhar.

$$Q_x = \gamma + \eta \cdot -\ln(X)^{\frac{1}{\beta}} \quad (13)$$

A função “*hazard*”, chamada de função risco, possibilita calcular a taxa de falha da distribuição Weibull dado um determinado tempo “t”.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \cdot \frac{t-\gamma}{\eta} \beta-1 \quad (14)$$

A função Mean Time To Failure (MTTF), ou em português, Tempo Médio Até Falha, possibilita o cálculo do tempo médio até falha para a população descrita pela distribuição de Weibull.

$$MTTF = \gamma + \eta \cdot \Gamma \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right) \quad (15)$$

A função gama, $\Gamma(n)$, consiste da seguinte equação:

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} e^{-x} \cdot x^{n-1} dx \quad (16)$$

3.2.3. Estimativa de Parâmetros

De acordo com Calixto (2016) a estimativa de parâmetros tem como finalidade ajustar a conformidade de um modelo estatístico a um conjunto de dados de vida, e a análise aderência é uma das etapas desse processo. No caso da distribuição Weibull, os parâmetros controlam a escala, a forma e o deslocamento da função pdf.

Vários métodos têm sido desenvolvidos para estimar os parâmetros que irão ajustar uma distribuição de vida à um conjunto de dados em particular. Alguns métodos de estimativa de parâmetros são análise de regressão em X (RRX), análise de regressão em Y (RRY) e estimativa da máxima verossimilhança (MLE). Dependendo do conjunto de dados um método de estimativa diferente pode ser melhor que outro, devido a classificação dos dados e também da quantidade de dados disponíveis [SMITH, 2001]. E esse método de estimativa auxiliará inclusive na escolha da distribuição que melhor se encaixa no conjunto de dados.

Segundo Calixto (2016) o método MLE é um método amplamente utilizado em casos que a amostra de dados possuem dados completos e censurados. O objetivo do método é maximizar a função verossimilhança (em inglês, chamada de "*Likelihood*") 16 e 17, ou a função média log-verossimilhança 18.

$$L(\theta, X) = f(x_1, x_2, \dots, \theta) = f(x_1, \theta) \cdot f(x_2, \theta) \cdot \dots \cdot f(x_n, \theta) \quad (16)$$

$$L(\theta, x) = \prod_{i=1}^n f(x_i, \theta) \quad (17)$$

$$l(\theta, x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln f(x_i, \theta) \quad (18)$$

Ainda segundo o aturo Calixto (2016) ao diferenciar a função verossimilhança ou a média log-verossimilhança pode-se buscar o máximo dessas funções a fim de isolar o parâmetro θ que corresponde ao(s) parâmetro(s) da distribuição Weibull. Nas situações em que o conjunto de dados possuem dados censurados o desenvolvimento e cálculo dos parâmetros pode se tornar oneroso, e por esse motivo utilizam-se métodos computacionais que auxiliam nessa etapa.

3.3. ANÁLISE RAM

O método chamado de Análise RAM é baseado no estudo estatístico do sistema levando em conta três conceitos: Confiabilidade (*Reliability*), Disponibilidade (*Availability*) e Manutenibilidade (*Maintainability*). A avaliação do desempenho de um equipamento ou sistema utilizando esse método propicia a identificação e melhoria dos equipamentos críticos, para que o sistema atinja a disponibilidade necessária.

A aplicação da metodologia segundo Calixto e Bretas (2008) pode ser resumida em três passos:

Para realização da análise RAM é necessário levantamento dos modos de falha dos equipamentos, que causam perda para o sistema estudado, o histórico de falhas e o tempo necessário para reparar cada modo de falha. O segundo passo dessa análise é modelar o sistema segundo a metodologia do Diagrama de blocos, que representa cada equipamento considerado no sistema em série ou em paralelo, dependendo da lógica de perda gerada para o sistema. O terceiro passo é a simulação direta, que descreve o comportamento do sistema ao longo do tempo segundo as características de falha e reparo de cada equipamento, dando o resultado de disponibilidade final do sistema, sendo possível observar a contribuição no percentual de perdas de cada equipamento no sistema (Calixto e Bretas, 2008).

Reforçando o fato de que a análise RAM depende da qualidade dos dados coletados e também da análise dos modos de falha.

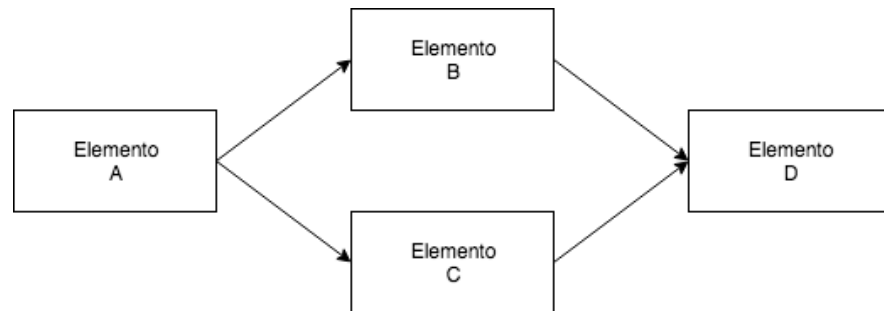
3.3.1. Modelagem do Sistema

Na análise de confiabilidade do sistema é construído um modelo do sistema, a partir do modelo dos componentes. Cada componente, a partir dos seus dados de vida, aproxima-se uma distribuição estatística que o representa. Ao considerar a associação lógica dos componentes será obtida uma distribuição que representa todo o sistema (Pallerosi, 2005).

3.3.2. Diagramas Analíticos

A abordagem analítica envolve a determinação de uma expressão matemática que descreve a confiabilidade do sistema em termos da confiabilidade dos seus componentes [LEEMIS, 1995]. Nesse método a modelagem do sistema em diagrama de blocos permitirá o cálculo da confiabilidade do sistema com base no arranjo dos seus subsistemas, conjuntos, componentes, e inclusive, redundâncias, e as distribuições estatísticas que descrevem a confiabilidade de cada um desses elementos. Os arranjos série, paralelo, k-em-n e redundâncias descritas anteriormente neste capítulo conduzem a análise de confiabilidade utilizando diagramas analíticos a construir uma equação que permite calcular a confiabilidade, e disponibilidade do sistema dentro de um determinado período.

Figura 3.16: Exemplo de sistema com 4 elementos.



Fonte: Autor (2018).

As opções de caminho de sucesso para o sistema da Figura 3.16 são representados pelas equações 19 a) e b).

$$a) X_1 = ABD; b) X_2 = ACD \quad (19)$$

A confiabilidade do sistema pode ser expressa pela probabilidade da união dos dois caminhos.

$$R_S = P(X_1 \cup X_2) \quad (20)$$

$$P(X_1 \cup X_2) = P(X_1) + P(X_2) - P(X_1 \cap X_2) \quad (21)$$

$$= P(ABD) + P(ACD) - P(ABCD) \quad (22)$$

Então:

$$R_S = R_A R_B R_D + R_A R_C R_D - R_A R_B R_C R_D \quad (23)$$

Segundo Reliawiki (2018), o estudo analítico da confiabilidade de um sistema não é praticável para sistema reparáveis onde outros fatores precisam ser levados em consideração para se obter tal análise de desempenho, para essas aplicações sugerem-se simulações para se atingir o cálculo de desempenho mais próximo da realidade.

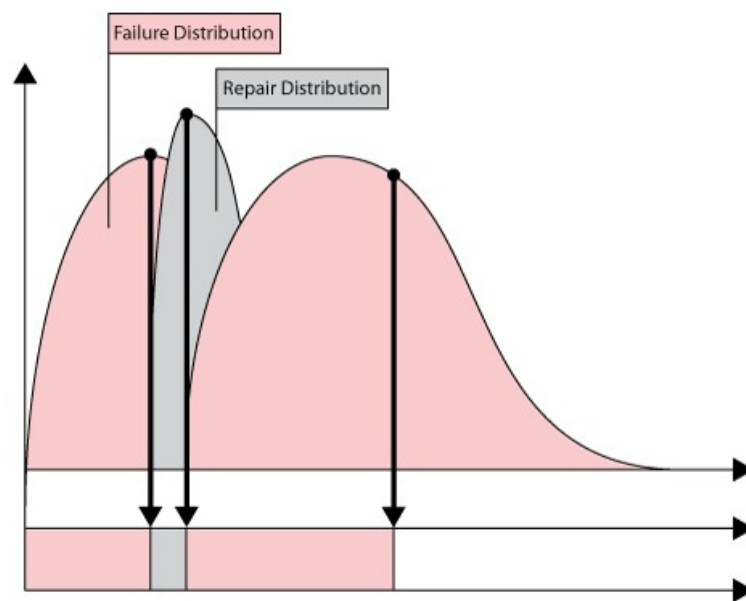
3.3.3. Diagramas de Simulação

Em contraste aos diagramas analíticos, os diagramas de simulação levam em conta reparos e ações de restauração, incluindo comportamentos de equipes,

sobressalentes, rendimento, entre outras características do sistema que podem afetar a disponibilidade (Reliasoft, 2019).

No método de análise por simulação, tempos de falhas aleatórios são gerados com base na distribuição estatística de falha de cada elemento do sistema. Esses tempos de falha são então considerados de acordo com o modo que os componentes estão arranjados logicamente dentro do sistema e os resultados são analisados para determinar o comportamento do sistema completo.

Figura 3.17: Exemplo de simulação com duas falhas e um reparo que ocorrem durante a vida do sistema.



Fonte: Reliasoft (2019).

A Figura 3.17 representa o modelo de simulação que utiliza tempos de falha aleatórios da distribuição estatística de falha e de reparo para projetar os dados de confiabilidade do sistema. Através da análise de simulação é possível "testar" o sistema digitalmente e identificar o comportamento dos elementos do sistema a fim de determinar qual elemento necessita de melhoria em termos de confiabilidade e/ou manutenibilidade.

3.4. BANCO DE DADOS

Parte desse trabalho será a comparação com o desempenho de equipamentos similares no mercado, e graças a bancos de dados com informações sobre os tempos de falha de equipamentos da indústria de óleo e gás essa etapa é possível e serve de referência em termos de qualidade do serviço entregue ao cliente final.

Em seu trabalho Santos (2011) descreve os bancos de dados da seguinte forma:

Bancos de dados de confiabilidade são desenvolvidos para otimizar os processos produtivos que dependem de equipamentos sujeitos a falhas. Estes bancos de dados, elaborados a partir da medição precisa de tempo de falha de equipamentos, permitem melhorar o desempenho da manutenção através da adoção da melhor política e prática de manutenção. Permitem inclusive inferir no projeto e nas condições operacionais de segurança das pessoas e do meio ambiente. A fim de alcançar esses objetivos, os bancos de dados de confiabilidade devem ser construídos com dados oriundos do sistema de interesse que reflitam as características funcionais e de projetos dos equipamentos, as condições ambientais de operação e as políticas de manutenção (Santos, 2011).

As indústrias de petróleo, gás natural e petroquímica têm demandado especial atenção ao confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança de equipamentos por motivos regulatórios e também a fim de garantir uma imagem que reflita qualidade. Ao mesmo tempo existe a necessidade de mercado que custo efetivo de projeto e manutenção para novas plantas e instalações existentes sejam igualmente discutidos. Através dos bancos de dados as informações de falhas, mecanismos de falhas e manutenção podem ser transmitidas entre as várias áreas de uma mesma companhia e entre companhias.

A coleta de dados exige grandes investimentos e padronização combinados a um efetivo gerenciamento eletrônico dos mesmos. Atualmente a ISO 14224, que é uma norma internacional, tem o objetivo de padronizar a coleta e as informações relevantes. Em termos de bancos de dados tem-se o OREDA contendo taxas de falhas de diversos equipamentos, sistemas, conjuntos e componentes utilizados na indústria de óleo e gás.

3.4.1. Offshore and Onshore Reliability Database - OREDA

O *Offshore and Onshore Reliability Database*, ou OREDA, é um banco de dados de confiabilidade de equipamentos da indústria de óleo e gás que inclui desde perfuração até refino, tanto de instalações terrestre quanto submarinas. Compreende dados de uma grande variedade de plataformas, tipos de equipamentos e condições operacionais. Segundo OREDA, 2015 esse projeto foi concebido pelas empresas produtoras de petróleo e gás de vários países, reunindo mais de 33.000 registros de falhas, contabilizados a partir do início dos anos de 1980. O projeto OREDA tem início em 1981 com o objetivo de coletar dados para análises de confiabilidade. Foi ampliado para abranger os equipamentos usados na exploração e produção de petróleo e gás.

Quadro 3.1: Quadro utilizado na base de dados OREDA.

Taxonomia (<i>Taxonomy no</i>)		n°		Itens				
População (<i>Population</i>)	Amostras (<i>Samples</i>)	Tempo agregado no serviço (10 ⁶ horas) <i>Aggregated time in service (10⁶ hours)</i>			N° de demandas (<i>No of demands</i>)			
		Tempo calendário (<i>Calendar time</i>)*	Tempo operacional (<i>Operational time</i>)†					
Modo de falha (<i>Failure mode</i>)	N° de falhas (<i>No of failure</i>)	Taxa de falhas (por 10 ⁶ horas) <i>Failure rate (per 10⁶ hrs)</i>			Atividade de reparo (horas) <i>Active repair (hours)</i>	Reparo (Horas-homem) <i>Repair (manhours)</i>		
		Inferior (Lower)	Médio (Mean)	Superior (Upper)		Mínimo (min)	Médio (mean)	Máximo (max)
Comentários (<i>Comments</i>):								

Fonte: OREDA (2015).

O projeto consistiu de diversas etapas e atualmente é atualizado com novos dados operacionais dos diversos tipos de equipamentos registrados nessa base de dados. Na década de 1980 o objetivo foi coletar e compilar dados de oito companhias em cooperação, focou-se em equipamentos críticos e foram armazenados em um banco de dados computadorizado. A base de dados foi publicada em 1984 e 1992 contendo 1600 equipamentos e 8400 eventos de falhas. Nas décadas de 1990 e meados de 2000 o banco de dados foi aumentado, um novo software começou a ser

utilizado e informações sobre manutenção começaram a ser registradas. Em paralelo iniciou-se o desenvolvimento da ISO 14224, *Petroleum and Natural Gas Industries – Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment*.

Quadro 3.2: Tabela exemplo com dados sobre Bombas Centrífugas.

Taxonomy no 1.3.1.9		Item Machinery Pumps Centrifugal Oil export									
Population 4	Installations 2	Aggregated time in service (10 ⁶ hours)					No of demands 480				
		Calendar time * 0.1018		Operational time † 0.0792							
Failure mode	No of failures	Failure rate (per 10 ⁶ hours)					Active rep. hrs		Manhours		
		Lower	Mean	Upper	SD	n / τ	Mean	Max	Mean	Max	
Critical	19* 19†	121.72 144.86	186.12 238.62	261.64 351.32	42.80 63.30	186.58 240.00	14	45	23	90	
Breakdown	1* 1†	0.04 0.06	9.67 12.21	36.47 44.87	13.45 16.57	9.82 12.63	18	18	35	35	
External leakage - Process medium	6* 6†	0.35 0.44	60.58 81.27	214.15 291.26	79.09 107.62	58.92 75.79	8.6	16	11	16	
Comments On demand probability for consequence class: Critical and failure mode: Fail to start on demand = 0											

Fonte: OREDA (2015).

Os Quadros 3.1 e 3.2 foram retiradas do OREDA 2015 e contém os dados que servem como referência para estudos de confiabilidade na indústria de óleo e gás mundialmente. Os campos descritos nas tabelas possuem informações relevantes e podem ser lidos da seguinte maneira:

- *Taxonomy number and item* - Código referente ao equipamento/componente que terá os dados apresentados.
- *Population* - Número total de itens que formaram a base da estimativa.
- *Samples/Installations* - Número total de amostras ou instalações de onde foram coletadas as informações.
- *Aggregated time in service* - Dois tipos de escalas de tempo são apresentados: tempo calendário e tempo operacional. O tempo acumulado para a população total é dado para ambas as escalas de tempo.
- *Number of demands* - É o número acumulado de demandas/ciclos para a população total, fornecido quando disponível.

- *Failure mode* - Contém a descrição resumida da forma como a falha ocorreu, quando a informação for disponível.
- *Number of failure* - O número total de evento de falhas é apresentado para cada modo de falha. O número acumulado de falhas é apresentado como todos os modos (*All modes*).
- *Failure rate* - Apresenta a taxa de falha para cada modo de falha. O valor médio representa a estimativa baseada nas informações disponíveis para apresentação usando o estimador OREDA. Os valores superiores e inferiores estabelecem o intervalo de incertezas e representam 90% do intervalo de confiança. O desvio padrão indica a variação entre as múltiplas amostras. A taxa da falha estimada para amostras homogêneas é dada na coluna "n/◆". A taxa de falha medida por 10⁶ horas refere-se ao tempo calendário (marcado com *) ou tempo operacional (marcado com †).
- *Active repair* - É a média do tempo calendário (em horas) para se analisar a falha, reparar e retornar ao serviço.
- *Repair* - Apresenta vários valores para o tempo de reparo (horas-homem). Os valores mínimos e máximos equivalem aos menores e maiores números de homens-hora para a atividade.
- *Comments* – Contém informação a respeito da probabilidade de falha sob demanda, quando disponível.

O fato dos dados serem genéricos, provenientes de operações em diferentes partes do mundo e diferentes condições cria um conjunto de dados esparso que possui uma ampla gama de modos de falhas, o que torna esse banco de dados extremamente útil.

3.4.1.1. Modos de Falha Padronizados OREDA

Outra informação muito relevante que faz parte do relatório OREDA são os modos de falha que são registrados para cada elemento que compõe a hierarquia dos equipamentos críticos que fazem parte do relatório.

O OREDA segue as definições da ISO 14224 para registrar as falhas em seu banco de dados, contudo segue também uma definição própria de severidade dessas falhas, conforme Santos (2011) a fim de exemplificar essas definições foi retirado do OREDA 2015 aos modos de falha de uma bomba centrífuga. A Tabela 3 e as descrições a seguir ilustram como os dados de falha são categorizados em severidade e modos de falha.

- **Severidade da falha:** O banco de dados OREDA classifica as falhas em quatro categorias de severidade: Crítica; Degradação; Incipiente; e Desconhecida.
 - **CRÍTICA:** é definida como uma falha que causa a perda imediata da capacidade do sistema desenvolver sua função principal.
 - **DEGRADAÇÃO:** é definida como uma falha que não interrompe todas as funções do sistema, mas compromete a função principal.
 - **INCIPIENTE:** é definida como uma falha que não tem efeito imediato sobre uma das funções do sistema.

Segundo Langseth (1998) pode-se segregar as falhas como críticas e não-críticas, onde as falhas não críticas contém as falhas de degradação, incipiente e desconhecida.

- **Modos de falha:** segundo IEC 191-05-22, pode ser definido como a forma como a falha é observada em um elemento falhado.

Quadro 3.3: Quadro com modos de falha para uma bomba centrífuga.

Modos de falhas	Abreviação
Ruído	RUI
Vibração	VIB
Manutenção	MAN
Erro de parâmetro	ERR
Parda espúria	PAR
Desconhecido	DES
Outros	OUT
Quebra	QBR
Vazamento processo	VAP
Baixo rendimento	RND
Vazamento utilidades	VZU
Vazamento interno	VZI
Alta temperatura	ATP
Defeito estrutural	DEF

Fonte: Santos (2013).

- Ruído: nível de pressão sonora acima de 85 dB;
- Vibração: falhas decorrentes vibração monitorada;
- Manutenção: falhas decorrentes de manutenções;
- Erro de parâmetro: operando fora de especificações;
- Perda espúria: perda desconhecida, inesperada;
- Desconhecido: falha desconhecida;
- Outros: falhas que não estão entre a taxonomia;
- Quebra: falha e parada do equipamento por fadiga, fissura, trinca, cisalhamento, etc;
- Vazamento processo: falhas no processo que levem a vazamento do fluido para meio externo;
- Baixo rendimento: Equipamento apresenta rendimento abaixo do especificado;
- Vazamento utilidades: vazamento de fluidos como óleo lubrificante, óleo refrigerante, ar ou gases de instrumentos;

- Vazamento interno: falhas decorrentes de vazamento fluido utilizado internamente;
- Alta temperatura: temperatura acima da especificada;
- Defeito estrutural: falhas decorrentes de erros de projeto.

3.5. SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi abordado o embasamento teórico com a descrição de vários conceitos de confiabilidade quantitativa, como: conceitos fundamentais de confiabilidade, análise de dados de vida, diagrama de blocos de confiabilidade, análise RAM e banco de dados.

O conteúdo abordado neste capítulo é de substancial contribuição para o presente estudo de caso devido apresentar o conhecimento teórico das ferramentas que serão utilizadas no desenvolvimento das etapas seguintes requeridas.

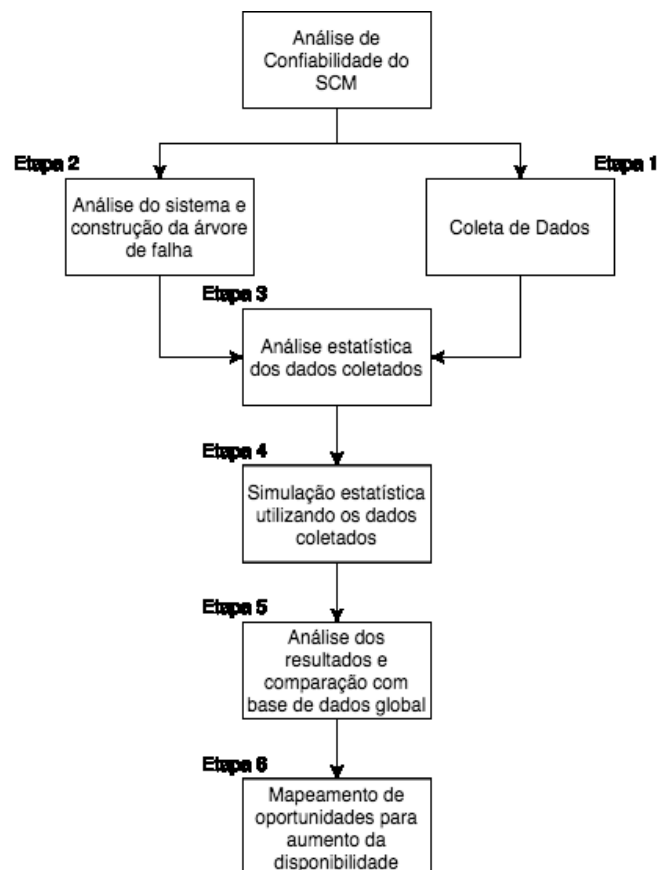
4. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo encontram-se a descrição da metodologia proposta, os materiais utilizados na pesquisa, o cálculo dos parâmetros considerados, as premissas sobre o ciclo de vida do equipamento e o uso do software com as informações do banco de dados do OREDA.

4.1. METODOLOGIA APLICADA

A análise das métricas de Confiabilidade que será demonstrada neste trabalho segue conceitos apresentados nos capítulos anteriores através de 6 etapas, conforme o diagrama apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1: Fluxograma da metodologia aplicada neste trabalho.



Fonte: Autor (2018).

As etapas sequenciais da metodologia aplicada inicia-se no planejamento da coleta de dados e tem fim na comparação com a base de dados OREDA e

identificação de oportunidades de melhoria para aumento da disponibilidade do sistema.

De acordo com o fluxograma da Figura 4.1 as etapas são:

- ETAPA 1 - Coleta de dados. Além análise para definir os dados a serem coletados, classificação e população a ser analisada;
- ETAPA 2 - Análise funcional do objeto a ser estudado e criação do modelo em sistema de blocos com os subsistemas e componentes críticos;
- ETAPA 3 - Análise estatística dos dados para definição da confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade do equipamento;
- ETAPA 4 - Aplicação dos modelos obtidos com a análise estatística no modelo do ativo em sistema de blocos;
- ETAPA 5 - Análise dos Resultados e comparação com o banco de dados global, OREDA 2015;
- ETAPA 6 - Mapeamento das oportunidades para aumento da disponibilidade.

4.2. COLETA DE DADOS

Para que o cálculo das métricas de confiabilidade (verificar Capítulo 2) seja possível alguns dados mínimos foram definidos como imprescindíveis para o estudo: Data da instalação do SCM, Data do comissionamento do SCM, Data em que a falha foi detectada, Data em que o sistema foi reparado ou substituído, e Modo de falha de acordo com ISO 14224.

A população escolhida foi a de módulos de controle submarinos instalados no Brasil, que somam 89 módulos no total. Neste trabalho serão apresentados dados de SCMs de outros lugares de mundo contudo os que apresentam um padrão mais constante na forma de operação são os utilizados em blocos nacionais.

O sistema computacional de gestão foi utilizado para exportar os registros de falhas e dados dos equipamentos instalados e comissionados. Nesse sistema as falhas são registradas, e alguns dados operacionais são capturados. Para padronização e compilação dos dados foi criada uma planilha simples para coleta dos

dados tanto históricos como recentes com base em relatórios operacionais, sensores que são monitorados continuamente e também registros de contato realizados junto ao cliente.

Quadro 4.1: Cabeçalho da planilha utilizada para coleta dos dados.

Asset Details					Operation			Fault recording								Retrieval information	
Client	Project / Field	Asset Location	SCM Material Number	SCM Serial Number	SCM Installed Date	SCM Commissioning Date	Run time	Date fault reported	ISO 14224 Fault Code	Fault description	Material number of faulty sub-assembly	Serial number of faulty sub-assembly	Material number of faulty part	Serial number of faulty part	Recording reference number	Retrieval Date	Retrieval Reason

Fonte: Autor (2018).

Os dados nesse caso serão focados no SCM e em seus componentes críticos que serão discutidos no próximo tópico. Esses dados poderão apresentar suspensão à direita, que ocorre quando o equipamento ainda não falhou e não se tem o dado de falha. A medida principal a se observar é o tempo até falha, ou tempo em operação, que será dado em dias, e convertido para horas em alguns cálculos.

4.3. ANÁLISE FUNCIONAL DO SCM

O estudo funcional do módulo de controle submarino foi feita através de discussões com especialistas no equipamento, análise dos dados de falha e também utilizando uma ferramenta chamada FMEA - *Failure Modes and Effects Analysis*, ou Análise de Modos de Falha e Efeitos.

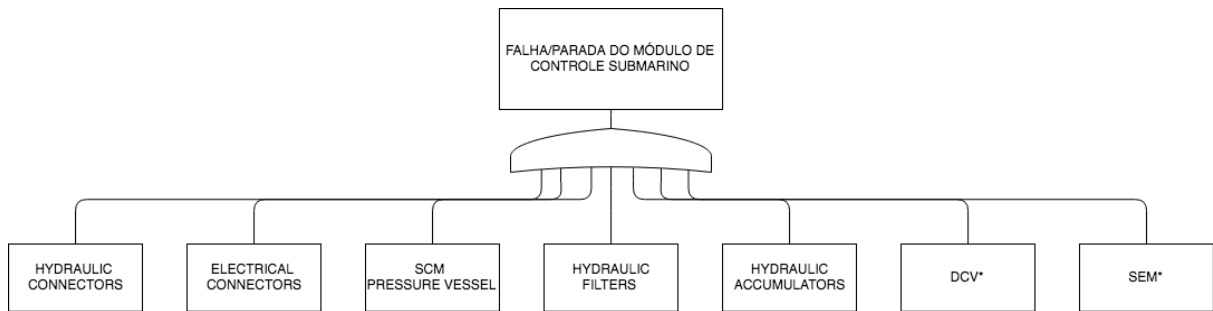
O objetivo final desse estudo foi definir os componentes críticos que podem levar a necessidade de substituição do módulo submarino devido a inoperabilidade ou comportamentos anormais que apresentem risco à operação.

A função principal do SCM é o controle à distância das válvulas da ANM, possibilitando controlar a produção ou injeção do poço de petróleo ou gás. Logo, qualquer subsistema deste equipamento que possa apresentar um modo de falha que comprometa a sua função principal deve ser considerado crítico.

A Figura 4.2 apresenta o diagrama de árvore de falhas referente a análise funcional na qual podemos observar os 7 subsistemas críticos do módulo de controle submarino.

Esses subsistemas além de serem críticos para o funcionamento do módulo, são subsistemas que apresentaram algum tipo de falha durante a coleta de dados dessa pesquisa, e também possuem dados de falha registrados no banco de dados OREDA.

Figura 4.2: Árvore de falhas do SCM.



Fonte: Autor (2018).

Para a elaboração do diagrama de árvore de falhas devem ser seguidos os seguintes passos, segundo Goldberg e Vesely (2014):

- 1) Definir o evento de topo, ou o evento indesejado. Nesse caso, a parada ou falha do módulo de controle submarino. Não apenas a função principal do SCM, que é de controlar as válvulas críticas da ANM à distância, mas também qualquer falha que resulte na decisão de substituir o SCM pode ser considerada uma falha do módulo.
- 2) Definição dos fatores contribuintes. Cada um dos subsistemas e a sua contribuição para a ocorrência do evento de topo faz parte dessa etapa. Para o caso dessa pesquisa os subsistemas críticos são considerados excludentes entre si, ou seja, a falha de um único subsistema leva a falha do sistema como um todo. Fazendo uma correlação com os diagramas de blocos, essa característica significa que o sistema funciona em série porém veremos mais adiante que os subsistemas SEM, DCV, *Hydraulic Accumulators* e *Hydraulic Filters* possuem redundâncias.
- 3) Coleta de dados quantitativos. Os dados de falhas dos subsistemas podem ser obtidos através de dados de campo, ou bancos de dados como o OREDA a fim de complementar a coleta de dados quando não se possui dados de falha para um determinado subsistema.

- 4) Cálculo da probabilidade de Ocorrência. A probabilidade de ocorrência do evento de topo depende dos dados quantitativos dos subsistemas e também da forma como estes estão conectados dentro do sistema. Com essas informações é possível formular a equação que representa o sistema, existem softwares que realizam esse cálculo com base na árvore de falhas ou do diagrama de blocos de confiabilidade.

A etapa 4 para construção da árvore de falha citada por Golberg e Vesely (2014) é parte do próximo tópico que descreve a análise dos dados de vida com base nos dados coletados em campo, e complementados com os dados da base de dados OREDA.

4.4. ANÁLISE DOS DADOS DE VIDA DO SCM

Conforme descrito no Capítulo 3 (item 3.2) a Análise de Dados de Vida é um estudo que utiliza os dados de falha, ou dados de sobrevivência de um dado sistema. O módulo de controle submarino, objeto desta pesquisa, possui dois conjuntos de dados que foram coletados: um conjunto contendo dados de vida de 89 SCMs instalados no Brasil, com registro de 13 falhas; e outro conjunto contendo dados de vida de 112 SCMs instalados fora do Brasil, com registro de 63 falhas.

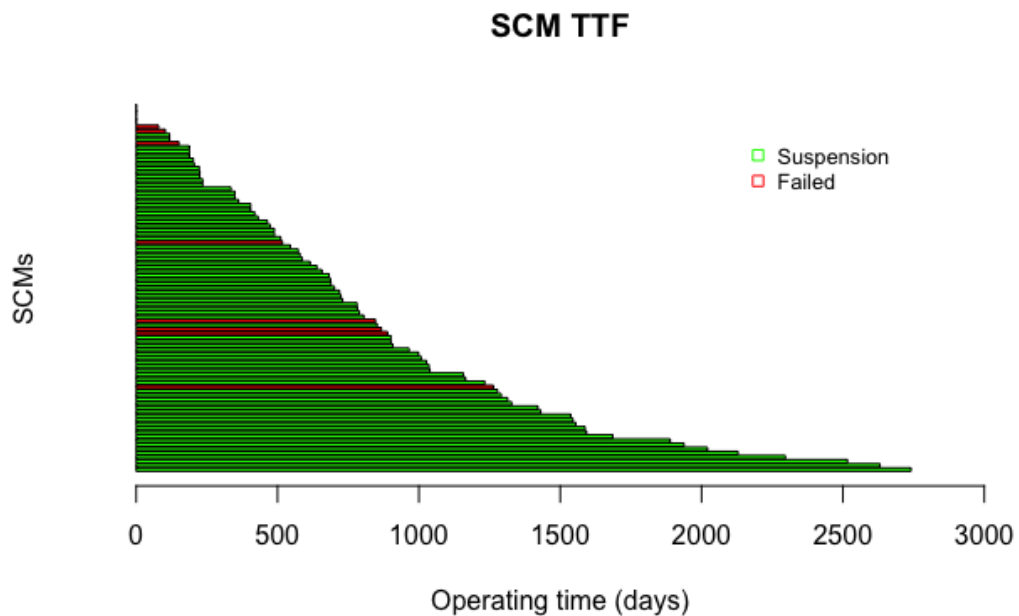
Com o objetivo de calcular métricas quantitativas sobre a confiabilidade do módulo de controle submarino as duas bases de dados citadas foram utilizadas.

A base para a análise dos dados de vida utiliza conceitos de estatística, e segue o processo descrito a seguir:

1. Definição do objetivo do estudo:
 - a. Calcular o tempo médio entre falhas do SCM para as duas bases de dados;
 - b. Calcular a confiabilidade do sistema para 1 ano, 5 anos, 10 anos e 25 anos;
 - c. Calcular a taxa de falha do sistema para 1 ano, 5 anos, 10 anos e 25 anos;
 - d. Identificar o padrão de falha para os SCMs.
2. Análise dos dados coletados e pré-processamento. Remoção dos pontos considerados com erro ou que possam conter erros com base nas especificações do equipamento;

3. Realizar os cálculos usando método computacional: utilizando o software WEIBULL da Reliasoft.
4. Apresentar os dados calculados para análise.

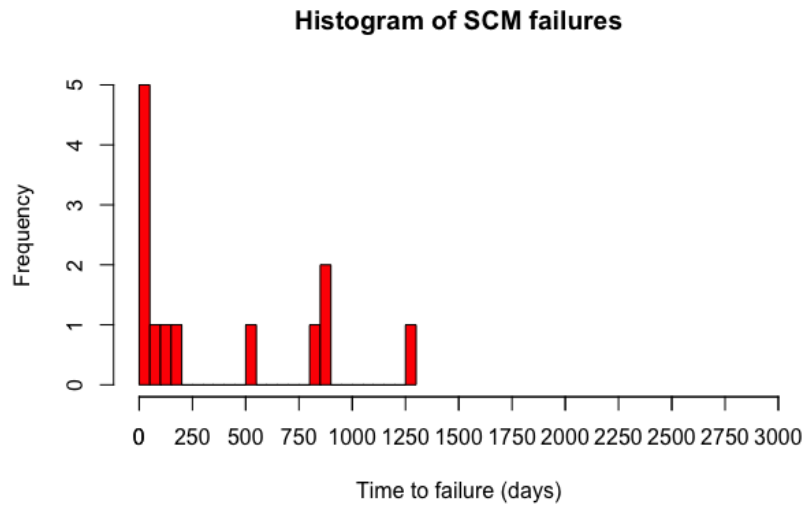
Figura 4.3: Representação dos dados de tempo até falha de SCMs instalados no Brasil.



Fonte: Autor (2018).

O passo 1 que define os objetivos da análise dos dados de vida é a etapa mais importante para que esteja claro quais os dados serão necessários bem como as métricas que se desejam estudar. Essas métricas foram definidas de acordo com a base de dados global OREDA a fim de demonstrar se o equipamento estudado está dentro de valores de confiabilidade esperados, bem como comparar com equipamentos operados em outros lugares do mundo, comparação entre as duas bases de dados utilizadas nesse estudo.

Figura 4.4: Histograma da base de dados de SCMs instalados no Brasil.



Fonte: Autor (2018).

Como o OREDA utiliza SCM e seus subsistemas críticos como referência para captação dos dados de tempo de falha a mesma estratégia foi realizada para esse estudo, da mesma forma o cálculo do tempo médio entre falhas, confiabilidade e taxa de falha. O padrão de falha não faz parte da base de dados OREDA, contudo auxilia na análise para entender o comportamento do sistema.

Tabela 4.1: Parâmetros calculados através do método MLE para a distribuição Weibull de dois parâmetros.

	Weibull Reliasoft		fitdistrplus R	
	Beta (forma)	Eta (vida característica em dias)	Beta (forma)	Eta (vida característica em dias)
Base de dados SCM instalados no Brasil	0,291193	212609,2	0,334756	197399,5
Base de dados SCM instalados fora do Brasil	0,554680	4418,1	0,575334	3279,6

Fonte: Autor (2018).

Em seu trabalho Nowlan e Heap (1978) menciona os 6 padrões de falha, que representam a probabilidade de falha em função do tempo de operação, sendo que 3

delas apresentam característica de perda de desempenho ao passar do tempo e outras 3 que não apresentam relação direta com o tempo de operação do equipamento.

O passo 2 envolve a pré-análise da base de dados, com o objetivo de eliminar possíveis dados que podem causar erros de cálculo. Falhas que não possuem uma definição de qual subsistema está envolvido na causa da falha, ou não se tem certeza do momento da falha são desconsiderados.

Tabela 4.2: Cálculo das métricas de Confiabilidade e Taxa de Falha para diferentes tempos de vida.

		1 ano (365 dias)	5 anos (1825 dias)	10 anos (3650 dias)	25 anos (9125 dias)
Base de dados SCM instalados no Brasil	Confiabilidade	0,8551	0,7786	0,7363	0,6705
	Taxa de Falha instantânea	1,25e-4	0,40e-4	0,24e-4	0,13e-4
Base de dados SCM instalados fora do Brasil	Confiabilidade	0,7782	0,5421	0,4068	0,2242
	Taxa de Falha instantânea	3,81e-4	1,86e-4	1,37e-4	0,91e-4

Fonte: Autor (2018).

O passo 3 é uma contribuição deste trabalho a fim de apresentar o cálculo realizado por um software reconhecido no mercado e utilizado em diversas empresas, com um software livre que possui códigos abertos para uso sem custo. Para o cálculo do tempo médio entre falhas, e da confiabilidade do sistema o primeiro passo é separar em SCM em operação, comissionados e apenas instalados. Os SCMs instalados são equipamentos que foram conectados a Árvore de Natal, contudo ainda não foram conectados a nenhum poço. Os SCMs que foram comissionados já estão conectados a um poço, contudo esse poço ainda não está em operação. Os SCM em operação são SCMs que já estão conectados a poços que estão produzindo ou injetando. Os SCMs categorizados como em operação, são os módulos que estão efetivamente ligados, já os comissionados ou instalados já foram ligados em campo alguma vez contudo não estão ligados de forma ininterrupta até o momento dessa análise. Devido a esse fato iremos separar essa base de dados dessa forma, porém falhas de SCMs apenas instalados e comissionados serão computadas de acordo com

a data de relato da falha da mesma forma que os em operação, a análise desses resultados será tratada no capítulo 5 deste trabalho. Com essa definição, os dados são então processados inicialmente para se entender qual a distribuição estatística que estes se aproximam mais, nesse caso foi utilizada a metodologia do Estimador de Máxima Verossimilhança (MLE - *Maximum Likelihood Estimation*). Essa metodologia conforme descrita no capítulo 3 auxilia na estimação dos parâmetros de uma determinada distribuição que se aproxima ao máximo dos dados coletados. No caso dos dados coletados dos SCMs a distribuição que mais se aproximou foi a distribuição Weibull de dois parâmetros, tanto no software Weibull da Reliasoft quanto utilizando a biblioteca *fitdistrplus* em R os resultados foram próximos.

Tabela 4.3: Tempo médio entre falhas de acordo com a distribuição estatística das duas bases de dados.

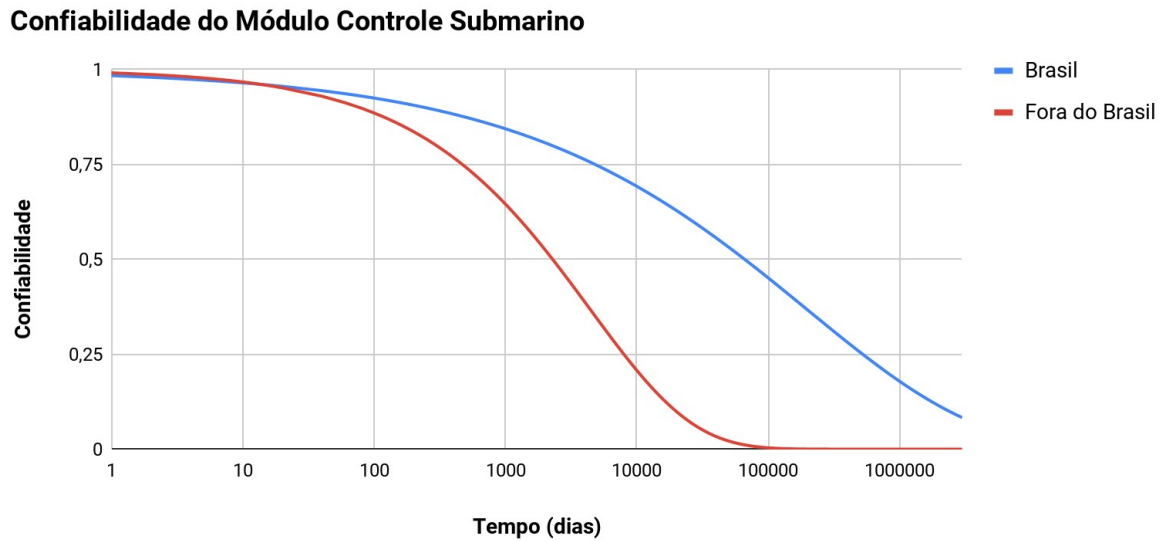
	Tempo Médio entre falhas	
	Weibull Reliasoft	R
Base de dados SCM instalados no Brasil	2257909,7 dias (aprox. 6000 anos)	1165446,6 dias (aprox. 3000 anos)
Base de dados SCM instalados fora do Brasil	7422,4 dias (aprox. 20 anos)	5223,8 dias (aprox. 14 anos)

Fonte: Autor (2018).

A definição dos parâmetros da distribuição Weibull apresentada na tabela 5 variou conforme a base de dados e também uma diferença entre as ferramentas de cálculo, no caso o *Software da Reliasoft Weibull* e a biblioteca *fitdistrplus* utilizada no Software R.

As Figuras 4.5 e 4.4 contém os gráficos com a métrica de confiabilidade e também de taxa de falha descritas pela distribuição Weibull para ambas base de dados. Os valores calculados para confiabilidade em 1, 5, 10 e 25 anos, podem ser observados na Tabela 4.2. E por fim, os valores de tempo médio entre falhas para as duas bases de dados pode ser observado na Tabela 4.3.

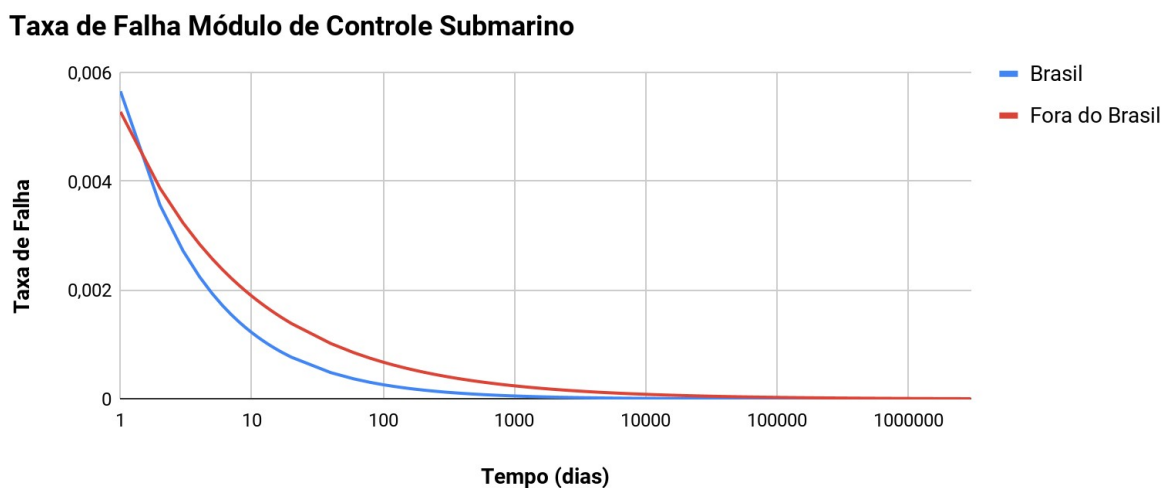
Figura 4.5: Gráfico representando a métrica de Confiabilidade no tempo para as duas bases de dados.



Fonte: Autor (2018).

Como pode-se notar nas Figuras 4.5 e 4.6 o padrão de falha de ambas bases de dados apresenta característica de falha prematura de acordo com o estudo de Nowlan e Heap de 1978. Esse padrão de falha não tem relação com o tempo de operação do equipamento, em outras palavras, o Módulo de Controle Submarino não apresenta degradação devido ao tempo de operação.

Figura 4.6: Gráfico representando a métrica de taxa de falha no tempo para as duas bases de dados.



Fonte: Autor (2018).

O passo 4 apresenta o resultados dos cálculos de forma clara para análise e comparação com a base de dados OREDA. Nesse caso a métrica de confiabilidade que é essencial para comparações é a Taxa de falha para 1.000.000 de horas de operação, conforme Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Valores de taxa de falha para 10e6 horas de operação, conforme base de dados OREDA 2015.

	Sistema / Subsistema	Taxa de Falha em 10e6 horas de operação
Base de dados SCM instalados no Brasil	SCM	7,34
	DCV	0,15
	SEM	1,41
Base de dados SCM instalados fora do Brasil	SCM	15,15
	DCV	0,06
	SEM	5,77
OREDA Melhores desempenhos	SCM	0,01
	DCV	0,00
	SEM	0,00
OREDA Média	SCM	25,11
	DCV	0,53
	SEM	9,90
OREDA Piores desempenhos	SCM	108,14
	DCV	2,41
	SEM	54,45

Fonte: Autor (2018).

4.5. ANÁLISE DOS DADOS OREDA E COMPARAÇÃO COM O MÓDULO DE CONTROLE SUBMARINO ESTUDADO

Esta seção tem o intuito apresentar as métricas de confiabilidade calculadas nos itens anteriores para que seja possível comparar com sistemas similares que possuem dados registrados na base de dados OREDA. Essa base de dados global possui uma série de dados compilados que servem como referência para modelagem de confiabilidade de sistemas.

A principal informação que OREDA apresenta é a taxa de falha em 10e6 de horas operacionais. Caracterizando então a distribuição estatística da base de dados como sendo exponencial onde a taxa de falha é constante, o que pode ser considerada uma limitação do OREDA uma vez que isso acaba por desconsiderar distribuições de taxas de falha não homogêneas no tempo. Por esse motivo é fundamental realizar o estudo estatístico da base de dados a fim de complementar os dados do OREDA. A análise de dados de vida no item anterior demonstrou inclusive que a probabilidade de falha pode ser irregular durante a vida do equipamento.

Os subsistemas que apresentam quantidade relevante de falhas são as Válvulas de Controle Solenóides (DCV), e o Módulo Eletrônico Submarino (SEM). Os demais subsistemas não apresentam quantidade de falha suficiente para serem considerados neste estudo.

Conforme pode-se notar na Tabela 4.4 os valores de taxa de falha para os equipamentos com melhores desempenho segundo a base de dados do OREDA 2015 são muito próximas de zero. O cálculo da taxa de falha para as bases de dados de SCMs instalado no Brasil e fora do Brasil contabilizou o total de horas operacionais dos SCMs, DCVs e SEMs, em seguida dividindo a quantidade de falha de cada um desses componentes pelo total de horas em operação, e por fim, multiplicando por 10e6 horas. Dessa forma obtemos a quantidade de falhas estimadas dentro de 10e6 horas de operação, conforme comentado anteriormente esse processo considera que a taxa de falha é constante no tempo o que é uma aproximação para facilitar cálculos de sistemas complexos.

4.6. OPORTUNIDADES PARA AUMENTO DA DISPONIBILIDADE

Esta seção tem o intuito discutir as oportunidades que o Módulo de Controle Submarino apresenta a fim de aumentar a confiabilidade e disponibilidade.

Analisando os dados apresentados nos itens anteriores nota-se que tanto os SCMs instalados no Brasil, quanto os SCMs instalados em outros países apresentam uma taxa de falha inferior a média de acordo com a base de dados OREDA. Isso destaca que esse modelo, projeto e fabricante tem um desempenho acima da média, contudo ainda com oportunidade de atingir o nível categorizado como melhores desempenhos.

Observando o valor de taxa de falha para a categoria de melhor desempenho segundo OREDA chegamos a conclusão que para atingir o nível de 1 falha em 10e6 horas seria necessário que tivessem 500 vezes mais horas de operação do que a quantidade atual para a mesma quantidade de falhas (13 falhas observadas até o momento deste estudo de caso). Para que seja possível atingir esses valores de taxa de falha é necessário então continuar aumentando a quantidade de equipamentos instalados e reduzir consideravelmente as falhas.

Nessa base de dados os subsistemas Módulo Eletrônico Submarino (SEM - *Subsea Electronic Module*) e Válvula Solenóide (DCV - *Directive Control Valve*) contribuem com mais de 90% das falhas registradas, o que nos leva a constatar que melhorias precisam ser focadas nesses dois subsistemas. O módulo eletrônico possui redundância, contudo fica a critério do operador do poço, no caso cliente que utiliza o SCM em solicitar a substituição do módulo quando esse subsistema apresenta falha uma vez que não é possível realizar reparo do sistema dessa forma mesmo com a redundância a SEM torna-se um item crítico.

A análise de causa raiz para as falhas apresentadas por esses dois subsistemas é fundamental para que ações possam ser tomadas e reduzir ou eliminar a ocorrência de falhas.

4.7. SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas as metodologias para o cálculo e estudo do Módulo de Controle Submarino, bem como o resultado obtido através da análise dos dados das duas bases de dados utilizadas: SCMs instalados no Brasil, e SCMs instalados fora do Brasil.

Adicionalmente ao que foi apresentado no capítulo, uma análise de funcionalidade junto com o time de especialistas bem como revisão dos dados e resultados com base nas características do equipamento trouxeram duas questões para serem avaliadas: o fato do padrão de falha ser de falha prematura; e o valor do tempo médio entre falhas para a base de dados de SCMs instalados no Brasil ser extremamente elevada

Tabela 4.5: Valores de taxa de falha para 10e6 horas de operação, conforme base de dados OREDA 2015.

	Parâmetros	Base de dados de SCMs instalados fora do Brasil	Base de dados de SCMs instalados no Brasil
0 a 615 dias	Beta (forma)	0,356099	0,233262
	Eta (vida característica)	10433,8	8697022,0
615 a 1230 dias	Beta (forma)	0,922609	1,736631
	Eta (vida característica)	15739,9	6650,5
1230 a 1845 dias	Beta (forma)	1,472923	2,296567
	Eta (vida característica)	10920,5	6982,3
Mais de 1845 dias	Beta (forma)	2,796922	-
	Eta (vida característica)	4810,5	-

Fonte: Autor (2018).

Com o intuito de contribuir para o trabalho, fez-se uma análise suplementar considerando que a base de dados possui uma grande quantidade de equipamentos operando há mais de 4 anos sem ter apresentado nenhuma falha. Esse fato contribuiu fortemente para que a distribuição estatística considera-se a base de dados como um todo predominantemente com características de falha prematura. A fim de elucidar e propor uma análise alternativa analisou-se o tempo médio de operação dos SCMs, resultando em 1230 dias. Determinaram-se então quatro janelas operacionais: 0 a 615 dias, 615 a 1230 dias, 1230 a 1845 dias, e mais de 1845 dias. Com essas janelas operacionais podemos observar quais equipamentos falharam dentro dessa janela, e também como parte da base de dados para análise temos os equipamentos que sobreviveram a essa janela de tempo de operação.

Tabela 4.6: Valores de taxa de falha e Confiabilidade das duas bases de dados.

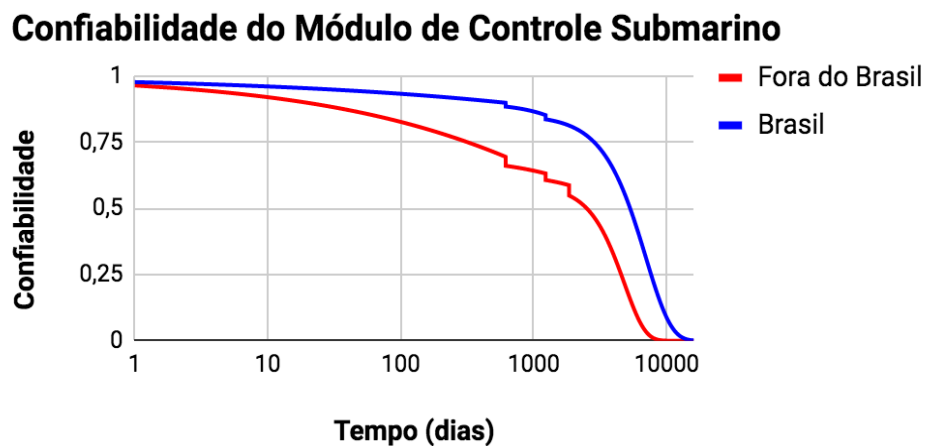
		1 ano (365 dias)	5 anos (1825 dias)	10 anos (3650 dias)	25 anos (9125 dias)
Base de dados SCM instalados no Brasil	Confiabilidade	0,9091	0,8683	0,7982	0,1574
	Taxa de Falha instantânea	0,61e-4	0,58e-4	1,42e-4	4,65e-4
Base de dados SCM instalados fora do Brasil	Confiabilidade	0,7386	0,6875	0,6300	0,0025
	Taxa de Falha instantânea	2,96e-4	0,58e-4	0,80e-4	18,37e-4

Fonte: Autor (2018).

Dessa forma, ao invés de tratarmos o SCM como um componente único, entendemos que existem modos de falha que se manifestam em diferentes períodos da vida do equipamento. A forma ideal seria termos mais dados de falha com maiores detalhes para fosse possível fazer essa segregação por características dos subsistemas, contudo devido a existência de redundâncias no sistema isso acaba acarretando outras complicações.

Desse modo, realizando a análise utilizando as janelas operacionais citadas anteriormente a Tabela 4.5 apresenta os parâmetros das distribuições estatísticas obtidas para da intervalo.

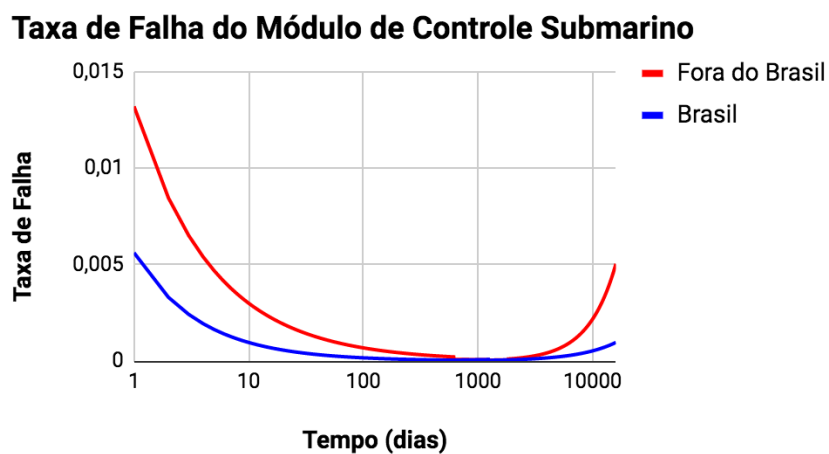
Figura 4.7: Gráfico representando a métrica de Confiabilidade no tempo para as duas bases de dados.



Fonte: Autor (2018).

Nas Figuras 4.7 e 4.8 pode-se observar os gráficos de Confiabilidade e Taxa de falha obtidos utilizando os parâmetros da Tabela 9 dentro das janelas operacionais definidas anteriormente. A Tabela 10 apresenta os valores de Confiabilidade e Taxa de falha para para 1, 5, 10 e 25 anos de operação de acordo com as distribuições definidas na Tabela 9.

Figura 4.8: Gráfico representando a métrica de Taxa de Falha no tempo para as duas bases de dados.



Fonte: Autor (2018).

O cálculo do tempo médio entre falhas se torna mais complexo pelo fato que são diversas distribuições que acompanham a vida do equipamento, contudo calculando em que ponto da vida do equipamento a Confiabilidade estaria abaixo de 0,25 chegamos a, aproximadamente, 21 anos para a base de dados de SCMs instalados no Brasil, e 13 anos para a base de dados de SCMs instalados fora do Brasil.

5. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados demonstram que a metodologia aplicada é eficaz para a análise das métricas de confiabilidade de ativos em geral, mas especialmente, os ativos do setor petroquímico.

A aplicação da análise de dados de vida, bem como o estudo funcional do Módulo de Controle Submarino proporcionou, através dos resultados das métricas de confiabilidade, que o sistema objeto da pesquisa está operando acima da média de desempenho quando comparado com a base de dados OREDA.

Conforme mostrado no desenvolvimento do trabalho, o SCM possui uma característica de falha prematura o que pode estar associado com algumas causas mais predominantes para esse tipo de padrão de falha:

- Falha no processo de instalação e comissionamento do equipamento;
- Desvios de operação devido a operar o equipamento fora do especificado.

Outra causa que poderia ser elencada seria a falha de projeto, contudo devido a baixa taxa de falha que o equipamento apresenta não apenas na base de dados de equipamentos instalados no Brasil, mas também em outros países pode-se considerar que a causa relacionada a projeto não é aplicável.

Os subsistemas que apresentaram maior impacto na confiabilidade do SCM foram o módulo eletrônico submarino e a válvula solenóide, dessa forma deve-se considerar algumas ações para aumento da confiabilidade desses subsistemas e consequentemente do SCM:

- Análises das causas raízes das falhas;
- Priorização de investimentos de melhoria ou obsolescência;
- Aplicação de ferramentas específicas de confiabilidade qualitativa e/ou quantitativa para monitoramento de parâmetros desses subsistemas.

A aplicação desta metodologia em outros equipamentos ou processos requer o devido registro dos dados, um software específico e a disponibilidade de recursos com conhecimento de ferramentas avançadas de confiabilidade.

5.1. DIFICULDADES ENCONTRADAS

A etapa deste trabalho que apresentou maior dificuldade para sua realização foi o levantamento e preparação dos dados.

Apesar de existir um banco de dados disponível para consulta e utilização, foram encontradas muitas dificuldades no levantamento de informações e na preparação dos dados de falha a serem utilizados nas ferramentas de confiabilidade quantitativa. Foram realizadas também entrevistas às pessoas envolvidas, com o objetivo de prover dados coerentes com a realidade e de não haver inconsistências que pudessem prejudicar a assertividade dos resultados da análise realizada.

Tal dificuldade reflete, em muitos casos, a falta da devida atenção no momento do preenchimento dos registros, a falta de cobrança e a baixa conscientização dos responsáveis pela geração das informações.

Percebe-se, portanto, que os sistemas utilizados atualmente não estão devidamente formatados e preparados para proporcionar levantamentos de dados de confiabilidade de maneira ágil e estruturada para futuros estudos de confiabilidade quantitativa.

Esta dificuldade nos trouxe uma clara visão da importância que deve ser dada em relação à qualidade, consistência e assertividade destas informações inseridas no banco de dados e o seu impacto em estudos futuros.

Outra dificuldade ocorreu durante os cálculos e análise dos resultados, devido à baixa quantidade de dados de falha cada dado de falha se torna ainda mais relevante para definição da distribuição estatística que melhor se ajusta aos pontos da base de dados. Soma-se a esse fato, a quantidade elevada de sistemas com censura a direita, ou seja, que ainda estão em operação sem nenhuma falha. Esses dois fatos impactam diretamente na análise estatística e influenciaram no resultado da métrica de tempo médio entre falhas, especificamente para a base de dados de SCMs instalados no Brasil. O tempo médio entre falhas de aproximadamente 3000 anos não faz sentido em uma aplicação real, o que levou a uma análise complementar a fim de considerar a aplicação desse equipamento. Como se trata de um ativo complexo, foram consideradas janelas operacionais conforme apresentado na conclusão do capítulo 4. Com essa metodologia foi possível inclusive observar um

padrão de falha conhecido como curva da banheira no qual tanto falhas prematuras, quanto falhas aleatórias e por desgaste são possíveis de se observar.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A aplicação deste estudo de caso possibilitou a identificação de novas etapas que irão permitir a continuidade deste trabalho de modo a proporcionar melhores resultados:

- Análise RAM do SCM com uma base de dados maior, ou seja, com maior quantidade de dados de falha com seus modos de falha bem definidos a fim de garantir uma análise mais robusta;
- Estudo sobre as causas raízes das falhas relacionadas com o Módulo Eletrônico Submarino, bem como as Válvulas Solenóides, a fim de auxiliar na melhoria de desempenho do SCM como um todo; segundo a própria base de dados OREDA esses dois elementos acumulam as maiores quantidades de falhas dentre os elementos mais críticos desse equipamento;
- Estudo de modelos estatísticos em equipamentos complexos com quantidade limitada de dados de falha.

Estas sugestões de novos trabalhos tem a intenção de complementar o que foi desenvolvido neste estudo, bem como as dificuldades apontadas são oportunidades de melhoria a fim de tornar os trabalhos sugeridos ainda mais relevantes para o setores que possuem equipamentos de alta complexidade e alta disponibilidade, onde a quantidade de dados de falha é limitada.

REFERÊNCIAS

ANAND, D K. **INTRODUCTION TO CONTROL SYSTEMS. VOL 8** - 2. ed. - Elsevier, 2013.

BAI, Yong; BAI, Qiang. **Subsea engineering handbook**. Burlington: Elsevier, 2010.

BARROS FILHO, ADAIL. **Utilização de Ferramentas de Confiabilidade em um Ambiente de Manufatura de Classe Mundial**. Unicamp, 2003.

BARROS FILHO, LAUDELINO V. **REPROJETO DE EQUIPAMENTOS MECATRÔNICOS COM BASE NA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE SISTEMAS**. UFSC, 2007.

BELLARBY, JONATHAN. **WELL COMPLETION DESIGN, VOL 56**. - 1. ed. - Elsevier, 2009.

BERVEN, J. **Subsea production control systems for all-electric Xmas Trees** - Stavanger, 2013.

BIROLINI, ALESSANDRO. **Reliability Engineering: Theory and Practice** - 8. ed. - Springer, 2017.

CALIXTO, E.; BRETAS, R. **ANÁLISE RAM+L: UM ESTUDO INTEGRADO DE VÁRIAS UNIDADE DE PRODUÇÃO DE UMA REFINARIA**. Abramam, 2008.

CONTROL SYSTEMS BROCHURE, **Aker Solutions subsea control systems brochure**. Disponível em: <<https://akersolutions.com/what-we-do/products-and-services/control-systems/>>, acesso em Julho 2019.

DIÁRIO DO PRÉ-SAL. **EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS**. Disponível em: <<https://diariodopresal.wordpress.com/petroleo-e-gas/>>, acessado em Julho 2019.

DIAS, ACIRES. **Metodologia para análise da confiabilidade em freios pneumáticos automotivos**. Unicamp, 1996.

DIGITRON controls and instrumentation connectors. **Siemens subsea connectors**. Siemens, 2011.

FRED - **Federal Reserve Bank of St. Louis** - Dados referentes ao valor de negociação do barril de petróleo. Disponível em: <<https://fred.stlouisfed.org/series/MCOILBRENTU>>, acessado em Julho 2019.

GOLBERG, F. F.; VESELY, W. E. **Fault Tree Handbook**. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014.

GUZZON, SAMANTA O. **Proposta de análise quantitativa de confiabilidade a partir de dados qualitativos provenientes da FMEA**. UFRGS, 2009.

IBP. **CICLO DE DEBATES SOBRE PETRÓLEO E ECONOMIA - CUSTOS E COMPETITIVIDADE DA ATIVIDADE DE E&P NO BRASIL**. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2016/07/TD-custosecompetitividade.pdf>>, acessado em Julho 2019.

KLEINERT, A. **The economics of high thrust turbofan maintenance**. Aircraft maintenance world, 1990.

LEEMIS, L. **Reliability: probabilistic models and statistical methods**. Prentice-Hall, 1995.

MERRIAM WEBSTER Dicionário. **Definição de falha**. Disponível em: <<https://www.merriam-webster.com/dictionary/failure>>, acessado em Julho 2019.

MORAIS, JOSÉ MAURO DE. **PETROBRAS: UMA HISTÓRIA DAS EXPLORAÇÕES EM ÁGUAS PROFUNDAS E NO PRÉ-SAL** / José Mauro de Moraes. - 1. ed. - Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

MOUBRAY, J., **Reliability-centered Maintenance (RCM) Manutenção centrada em Confiabilidade– edição brasileira** – Grã Bretanha: Aladon/Biddles, 2000.

NOGUCHI, A. **ESTUDO DE UM SISTEMA DE CONTROLE PARA UM MANIFOLD SUBMARINO DE INJEÇÃO** - UTFPR, 2014.

NOWLAN, F. S.; HEAP, H. F. **Reliability Centered Maintenance**. US Department of Commerce, 1978.

OIL and GAS ONLINE. **iCON ELECTRONIC MODULE**. Disponível em: <<https://www.oilandgasonline.com/doc/icon-electronic-module-0001>>, acessado em Julho 2019.

OREDA. **OREDA 2015 handbook**. DNVGL.com. Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd. Retrieved 12 September 2015.

PALLEROSI, C. A. **Redundâncias: por que, quando e como aplicá-las?** Simpósio Internacional de Confiabilidade - Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Confiabilidade Conceitos Básicos e metodos de cálculo**. São Paulo, 2000.

_____. **Confiabilidade A quarta dimensão da qualidade – Confiabilidade de Sistemas**. São Paulo, 2001.

PETROBRAS. **PETROBRAS ANNUAL REPORT 2017**. Disponível em: <<https://www.investidorpetrobras.com.br/enu/1179/AnnualReport2017.pdf>>, acessado em Julho 2019.

RELIAWIKI. **Introduction to Life Data Analysis**. Disponível em: <[http://www.reliawiki.org/index.php/Introduction to Life Data Analysis](http://www.reliawiki.org/index.php/Introduction_to_Life_Data_Analysis)>, acessado em Julho 2019.

RELIAWIKI. **Repairable systems analysis**. Disponível em: <http://reliawiki.org/index.php/Repairable_Systems_Analysis>, acessado em Julho 2019.

RELIAWIKI. **Repairable systems analysis through simulation**. Disponível em: <[http://reliawiki.com/index.php/Repairable Systems Analysis Through Simulation](http://reliawiki.com/index.php/Repairable_Systems_Analysis_Through_Simulation)>, acessado em Julho 2019.

SANTOS, JULIO C. **Análise de confiabilidade de uma bomba centrífuga: Aplicação na injeção de água para recuperação de petróleo**. UFRN, 2011.

SIEMENS Subsea Products. **Subsea electrical connectors**. Disp. em: <<https://w3.siemens.com/markets/global/en/oil-gas/pages/subsea.aspx>>, acessado em Julho 2019.

SINGER, S. FRED. AMERICAN THINKER. **"World price of oil -- where is OPEC now?"** Disponível em: <https://www.americanthinker.com/articles/2015/01/world_price_of_oil_where_is_opec_now.html>, acessado em Julho 2019.

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

TELEDYNE Marine Products. **Flying leads and harness assemblies**. Disponível em: <<http://www.teledynemarine.com/flying-leads-and-harness-assemblies?ProductLineID=80>>, acessado em Julho 2019.