

**Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia Fluminense**

Programa de Pós-graduação em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE UM SISTEMA DE CONTROLE
DE POÇOS SUBMARINOS DE PETRÓLEO**

ANTONIO HEVERTTON MARTINS SILVA

2017

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense
Programa de Pós-graduação em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE UM SISTEMA DE CONTROLE
DE POÇOS SUBMARINOS DE PETRÓLEO**

ANTONIO HEVERTTON MARTINS SILVA

Henrique Rego Monteiro da Hora

(Orientador)

Rodrigo Martins Fernandes

(Co-Orientador)

Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do grau de **Mestre**, ao Programa de Pós-graduação em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão, Área de Concentração em Sistemas Computacionais.

Campos dos Goytacazes, RJ

Novembro de 2017

Biblioteca Anton Dakitsch
CIP - Catalogação na Publicação

S532a Silva, Antonio Hevertton Martins
Análise de confiabilidade de um sistema de controle de poços submarinos de petróleo / Antonio Hevertton Martins Silva - 2017.
81 f.: il. color.

Orientador: Henrique Rego Monteiro da Hora
Coorientador: Rodrigo Martins Fernandes

Dissertação (mestrado) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campus Campos Centro, Curso de Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão, Campos dos Goytacazes, RJ, 2017.
Referências: f. 53 a 58.

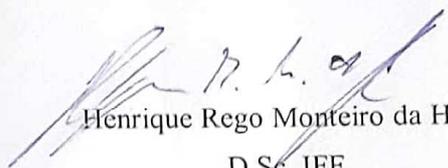
1. Equipamentos Submarinos. 2. Análise de Confiabilidade. 3. Sistema de Controle. 4. Reliability. 5. Subsea Control . I. da Hora, Henrique Rego Monteiro, orient. II. Fernandes, Rodrigo Martins , coorient. III. Título.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense
Programa de Pós-graduação em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão

ANTONIO HEVERTTON MARTINS SILVA

Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do grau de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão, Área de Concentração em Sistemas Computacionais.

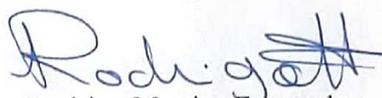
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA EM 10/11/2017



Henrique Rego Monteiro da Hora

D.Sc, IFF

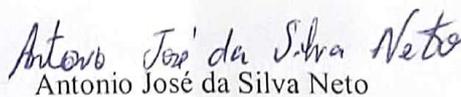
(Orientador)



Rodrigo Martins Fernandes

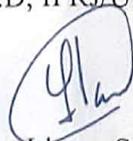
D.Sc, IFF

(Co-Orientador)



Antonio José da Silva Neto

Ph.D, IPRJ/UERJ



Orestes Llanes Santiago,

D.Sc, CUJAE (Cuba)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Antonio e Conceição, e meu irmão, pelo apoio em todos os passos da minha jornada.

À minha companheira Aline, pelo incentivo, suporte e compreensão.

Ao Prof. Henrique da Hora que me aceitou como orientando, mesmo sem que eu tivesse definido o escopo da pesquisa, pela valiosa contribuição e sugestões de melhoria.

Ao Prof. Rodrigo Fernandes, co-orientador, pela paciência nas conversas que levaram a definir o tema deste trabalho.

À Petrobras, na figura dos meus gerentes imediatos, Leonardo Tutanko, Marcelo Cantarino e Ubirajara Alvarenga, pela flexibilização no cumprimento da minha jornada de trabalho.

Ao IFF por possibilitar e difundir a pós-graduação fora dos grandes centros urbanos.

RESUMO

Objetivo: Esse trabalho tem como objetivo realizar um estudo quantitativo e qualitativo sobre a confiabilidade de sistemas de controle automático de equipamentos submarinos aplicados na produção de óleo e gás, de modo a identificar os pontos críticos e modos de falhas mais prováveis de ocorrerem durante a fase de operação.

Metodologia: No desenvolvimento da pesquisa é feita uma análise funcional do sistema de controle para definir a função a ser modelada pelas técnicas de diagrama de blocos de confiabilidade e análise de árvore de falhas. Os dados de taxa de falha utilizados foram obtidos através de pesquisa documental no banco de dados mantido pela OREDA.

Resultados e Conclusões: Foi possível estimar a confiabilidade do sistema ao longo do tempo e identificar os equipamentos que tem maior influência na confiabilidade. Os equipamentos de superfície são os que tem maior impacto da não confiabilidade do sistema, seguido pelo bloco de válvulas direcionais que atuam os equipamentos. Também foram identificados os modos de falha com maior probabilidade de levarem o sistema ao estado de falha.

A limitação do estudo é que os dados de falha utilizados para equipamentos elétricos e eletrônicos não estão no nível de componente, como ocorre para os componentes mecânicos e hidráulicos.

Para futuros trabalhos sugere-se estudar outras topologias para o sistema de modo a contornar ou minimizar a influência dos componentes e falhas críticas aqui identificadas. Outra sugestão seria propor novas tecnologias em substituição ao equipamentos e componentes atualmente utilizados.

Palavras-chave: Equipamentos Submarinos; Análise de Confiabilidade; Sistema de Controle.

ABSTRACT

Research Problem: The aim of this study is perform a quantitative and qualitative study on the reliability of automatic control systems for subsea equipment applied to offshore oil and gas production and identify the critical components and most likely failures modes on operation life-cycle.

Methodology: In the development of the research, a functional analysis of the control system was performed to define the function to be modelled by the reliability block diagram and fault tree analysis techniques. The failure rate data source is OREDA handbook.

Results and Conclusions: It was possible estimates systems' reliability over time and identify the equipment that has the major influence on reliability. Topside equipment is the one that has more impact on system's unreliability, followed by the directional control valves block. The most likely failure modes that drives system to fail were also identified.

The limitation of the study was the failure rate data for electrical and electronic equipment are not at the component level, as for mechanical and hydraulic components.

Future work could study other topologies for the system in order to minimize influence of the components and critical failure. Another suggestion would be to propose new technologies to replace the equipment and components currently used.

Keywords: Subsea Equipment; Reliability Analysis; Control System

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Consumo total de energia mundial, em quadrilhão de BTU, por tipo de fonte.....	1
Figura 1.2 – Investimentos em engenharia submarina por região – 2010-2015.....	3
Figura 1.3 – Sistema submarino de produção.....	4
Figura 1.4 – Áreas de conhecimento da engenharia envolvidas no sistema de controle submarino eletro-hidráulico multiplexado.....	6
Figura 1.5 – Representação esquemática do sistema de controle MUX.....	6
Figura 2.1 – Curva da banheira.....	15
Figura 2.2 – Fatores que influenciam a análise de confiabilidade.....	16
Figura 2.3 – Sistema série (a) e paralelo(b).....	17
Figura 3.1 – Fluxograma do procedimento metodológico adotado.....	23
Figura 3.2 – Fluxo de processo para construção de árvore de falhas.....	24
Figura 4.1 – Diagrama de blocos funcional do sistema estudado.....	29
Figura 4.2 – Arquitetura típica de uma MCS e EPU.....	30
Figura 4.3 – Arquitetura funcional do SCM: componentes eletrônicos.....	31
Figura 4.4 – Arquitetura funcional do SCM: componentes mecânicos.....	32
Figura 4.5 – DBC para os componentes de superfície.....	33
Figura 4.6 – Confiabilidade dos equipamentos de superfície.....	35
Figura 4.7 – DBC para os componentes eletrônicos submarinos.....	36
Figura 4.8 – Confiabilidade dos componentes eletrônicos submarinos.....	37
Figura 4.9 – DBC dos componentes mecânicos e hidráulicos submarinos.....	39
Figura 4.10 – Confiabilidade dos componentes mecânicos e hidráulicos submarinos.....	40
Figura 4.11 – DBC de todo o sistema de controle.....	41
Figura 4.12 – Confiabilidade do SCS MUX.....	41
Figura 4.13 – Comparação entre o subsistema de superfície e submarino.....	42

Figura 4.14 – Confiabilidade do SCS MUX para até 5 poços.	43
Figura 4.15 – Índice de Birnbaum para o SCS MUX.....	44
Figura 4.16 – Medida de importância crítica do SCS MUX.....	44
Figura 4.17 – Árvore de falha: Evento topo.....	47
Figura 4.18 – Probabilidade de falha pela AAF.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Áreas de conhecimento pesquisadas na base <i>Scopus</i>	9
Tabela 1.2 – Resumo dos trabalhos correlatos.....	11
Tabela 3.1 – Dados acumulados divulgados pela OREDA em 2015.	26
Tabela 4.1 – Taxa de falhas dos equipamentos de superfície.	34
Tabela 4.2 – Taxas de falhas dos componentes elétricos e eletrônicos.	36
Tabela 4.3 – Taxas de falhas dos componentes mecânicos e hidráulicos submarinos.	38
Tabela 4.4 – Cut sets com probabilidade mais altas.....	50

LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS

AAE	- Análise de Árvore de Eventos
AAF	- Análise de Árvore de Falhas
AI	- <i>Analog Input</i>
ANM	- Árvore de Natal Molhada
BOP	- <i>Blow Out Preventer</i>
CLP	- Controlador Lógico Programável
CPU	- <i>Central Processing Unit</i>
DBC	- Diagrama de Blocos de Confiabilidade
DCS	- <i>Distributed Control System</i>
DCV	- <i>Directional Control Valve</i>
DHSV	- <i>Downhole Safety Valve</i>
DNV	- <i>Det Norske Veritas</i>
DO	- <i>Digital Output</i>
EFL	- <i>Electrical Flying Lead</i>
EPU	- <i>Electrical Power Unit</i>
ESD	- <i>Emergency Shut Down</i>
EUA	- Estados Unidos da América
EWS	- <i>Engineering Workstation</i>
FMEA	- <i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FMECA	- <i>Failure Mode, Effects and Criticality Analysis</i>
FT	- <i>Flow Transmitter</i>
FTA	- <i>Fault Tree Analysis</i>
HFL	- <i>Hydraulic Flying Lead</i>
HP	- <i>High Pressure</i>

HPU	- <i>Hydraulic Power Unit</i>
LDA	- Lâmina d'água
LP	- <i>Low Pressure</i>
MCS	- <i>Master Control Station</i>
MTTF	- <i>Mean Time To Failure</i>
MUX	- <i>Multiplex Control System</i>
OPEX	- <i>Operational Expenditure</i>
OREDA	- <i>Offshore and Onshore Reliability Data</i>
PLEM	- <i>Pipeline End Manifold</i>
PLET	- <i>Pipeline End Termination</i>
PT	- <i>Pressure Transmitter</i>
ROV	- <i>Remotely Operated Vehicle</i>
SCM	- <i>Subsea Control Module</i>
SCS	- Sistema de Controle Submarino
SEM	- <i>Subsea Electronic Module</i>
SSSV	- <i>Subsurface Safety Valve</i>
TPT	- Transdutor de Pressão e Temperatura
TUTA	- <i>Topside Umbilical Termination Assembly</i>
UEH	- Umbilical Eletro-hidráulico
UEP	- Unidade Estacionária de Produção

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Panorama geral.....	1
1.2	Tecnologia submarina na Indústria de Óleo e Gás	4
1.2.1	Sistema de controle submarino.....	5
1.3	Motivação.....	7
1.4	Objetivo.....	8
1.5	Trabalhos correlatos.....	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Confiabilidade.....	12
2.2	Taxa de Falha	13
2.3	Confiabilidade de Sistemas.....	15
2.4	Técnicas aplicáveis à análise de confiabilidade	16
2.4.1	Diagrama de blocos de confiabilidade (DBC).....	17
2.4.2	Análise de árvore de falha (AAF).....	18
2.5	Medidas de importância de componentes.....	19
3	METODOLOGIA	21
3.1	Classificação da pesquisa.....	21
3.2	Análise funcional e de confiabilidade do sistema	21
3.3	Softwares.....	25
3.4	Coleta de dados de falha.....	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1	Visão sistêmica do sistema de controle submarino multiplexado.....	28
4.2	Análise por Diagrama de Blocos.....	33

4.2.1	Confiabilidade dos componentes eletrônicos de superfície	33
4.2.2	Confiabilidade dos componentes eletrônicos submarinos	35
4.2.3	Confiabilidade dos componentes submarinos mecânicos e hidráulicos	38
4.2.4	Confiabilidade do SCS MUX.....	41
4.2.5	Medidas de importância dos subsistemas do SCS	43
4.3	Análise por Árvore de Falha.....	45
4.3.1	Análise Quantitativa	45
4.3.2	Análise Qualitativa	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
5.1	Trabalhos Futuros	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
	APÊNDICE A – CÁLCULO DA CONFIABILIDADE DOS COMPONENTES SUBMARINOS MECÂNICOS E HIDRÁULICOS.....	59
	APÊNDICE B – ÁRVORE DE FALHA NO SOFTWARE R.....	60
	APÊNDICE C – EVENTOS BÁSICOS	65
	APÊNDICE D – <i>MINIMAL CUT SET</i> (CORTES MÍNIMOS).....	68
	APÊNDICE E – ÁRVORE DE FALHA DO SISTEMA DE CONTROLE SUBMARINO	70

1 INTRODUÇÃO

1.1 Panorama geral

A indústria do petróleo tem papel extremamente importante na economia brasileira. Em 2014, por exemplo, o setor de óleo e gás representou 10,9% do PIB industrial do Brasil. Mesmo após a recente retração no valor do barril em 2015, o plano de negócios 2017-2021 da Petrobras, maior operadora atuante no território nacional, prevê um investimento de US\$ 74,1 bilhões, sendo a maior parte desse investimento, em torno de 82%, destinado para a área de exploração e produção (Petrobras, 2016).

Segundo estudos realizados pela *Energy Information Administration* (EIA), o consumo mundial de energia a partir de todas as fontes de combustível aumentará até 2040, conforme ilustrado na Figura 1.1. As fontes renováveis são a fonte de energia com crescimento mais rápido durante o período de projeção com aumento, em média, de 2,6% ao ano entre 2012 e 2040. A energia nuclear será a segunda maior fonte de energia em termos de crescimento, aumentando 2,3% ao ano durante esse período (EIA, 2016). As curvas pontilhadas para carvão e renováveis mostram a projeção do impacto do plano de energia limpa dos EUA.

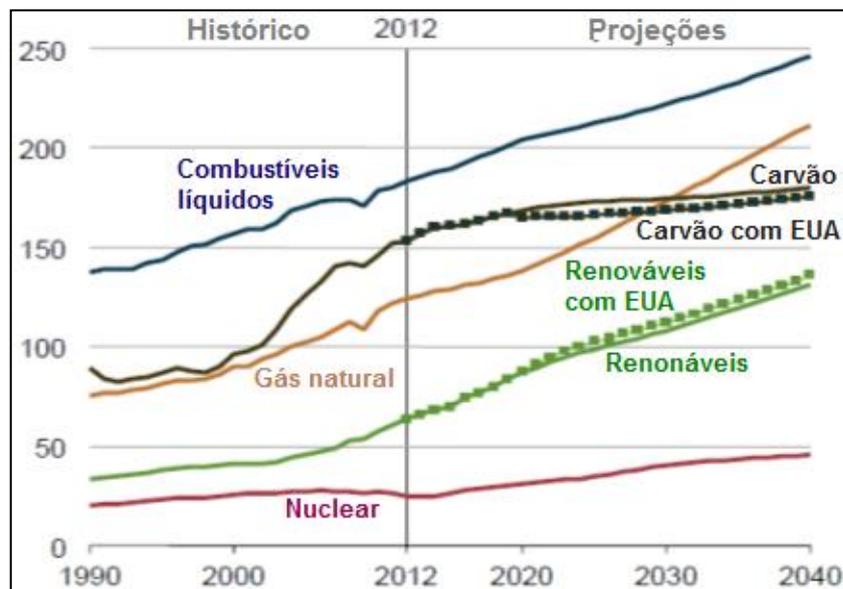


Figura 1.1 – Consumo total de energia mundial, em quadrilhão de BTU, por tipo de fonte.

Fonte: EIA (2016).

Embora o consumo de combustíveis não fósseis deva crescer mais rápido do que o consumo de combustíveis fósseis, este último ainda representará 78% do uso global de energia em 2040. Os combustíveis líquidos – principalmente a base de petróleo – permanecerão como

a maior fonte de consumo mundial de energia, tendo uma pequena redução da sua participação no consumo mundial de energia comercializada de 33% em 2012 para 30% em 2040 (EIA, 2016).

Maior parte desse petróleo vem sendo e será provido, cada vez mais, a partir de reservatórios marítimos (*offshore*). Em novembro de 2016 foi produzida uma média 2,609 milhões de barris de óleo e 111,1 milhões de m³ de gás por dia. Desse total, os campos marítimos representaram 94,5% e 76,9% da produção de óleo e gás, respectivamente (ANP, 2017). Para suportar essa produção o número de sistemas de produção submarinos tem aumentado bastante a partir de 1990 (Bai & Bai, 2010). No Brasil, apenas nos campos operados pela Petrobras, já foram instalados mais de 1.000 equipamentos no leito marinho.

Extrair e transportar o petróleo de reservatórios *offshores* em águas profundas e ultra-profundas exigem sistemas de produção submarinos. A tecnologia voltada para equipamentos submarinos utilizados na produção de óleo e gás é um campo de aplicação altamente especializado que coloca demandas específicas e pontuais para a engenharia (Bai & Bai, 2010).

O sistema de produção submarino tem alguns aspectos únicos relacionados à inacessibilidade para instalação e manutenção, dessa forma exige equipamentos complexos e não usuais à indústria. Segundo Benard, Cauffriez & Renaux (2008), a complexidade dos equipamentos pode ser caracterizada em função de diferentes atributos como: tecnologia, estados, funções, tamanho e interação de componentes e sistemas. Essas características podem tornar o sistema inviável tecnicamente ou economicamente.

Equipamentos submarinos requerem alta disponibilidade, ou seja, devem ser confiáveis o suficiente para manter o meio ambiente e as pessoas em segurança e evitar ao máximo a necessidade de intervenção, seja para operação ou manutenção (Dash, 2012). Qualquer reparo ou necessidade de intervenção em um equipamento instalado é muito caro por demandar recursos, tais como navios de intervenção e sondas de completação¹, cujo custo diário pode variar de 50 a 500 mil dólares. Além do custo direto, destacam-se os custos de oportunidade, lucro cessante de um poço fechado, principalmente no cenário dos poços perfurados nos campos do pré-sal que apresentam boa qualidade e elevada produtividade de óleo.

¹ É o conjunto de operações necessárias para equipar o poço, depois de perfurado, e deixá-lo apto à produção.

Esse mercado de equipamentos submarinos é concentrado em poucos países. Brasil, Angola, Nigéria, Estados Unidos e Noruega representam mais de 60% da demanda. Até 2015, a maior parte dos investimentos na área estavam voltados para atender o norte africano, entretanto, o Brasil, na figura da Petrobras, também demandou altos investimentos (Mendes, Romeiro, & Costa, 2012). Na Figura 1.2 é possível observar que a América do Sul, influenciada quase que na totalidade pelo Brasil, demandou investimentos da ordem de 14 bilhões de dólares.

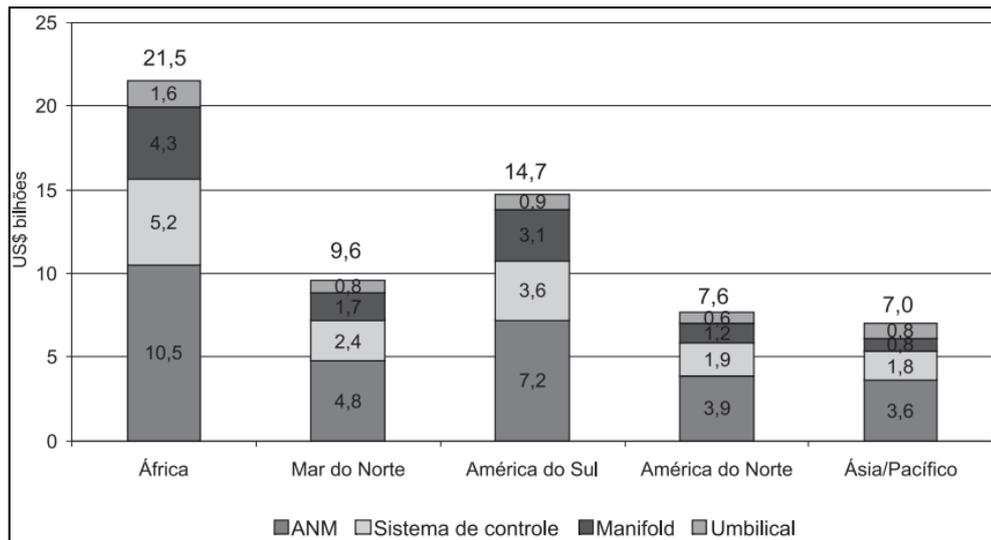


Figura 1.2 – Investimentos em engenharia submarina por região – 2010-2015.

Fonte: Mendes *et al.* (2012).

O avanço da produção em áreas cada vez mais remotas e a necessidade de desempenhar mais funções fez com que se desenvolvessem equipamentos eletrônicos para monitoração e controle dos processos submarinos, surgiu daí o sistema de controle submarino (SCS). De acordo com a ISO (2006), a norma 13628-6 define o SCS como sendo o sistema de controle que opera um sistema de produção submarino durante as operações de produção. O SCS é o coração de qualquer sistema de produção submarino e é um item relativamente barato quando comparado com o custo de perfuração, construção e instalação de dutos, instalação dos próprios equipamentos, etc. (Bai & Bai, 2010). No entanto, a perda de confiabilidade de longo prazo pode gerar problemas operacionais, alta periodicidade de intervenção e manutenção e risco à segurança do processo.

1.2 Tecnologia submarina na Indústria de Óleo e Gás

Os sistemas submarinos de produção de óleo e gás são formados pelo conjunto de equipamentos instalados entre a linha d'água e o leito marinho e têm como objetivo permitir a produção segura e controlada dos fluidos do reservatório. Atualmente, nos campos brasileiros, tais equipamentos podem estar numa profundidade de até 2.300m.

Um sistema de produção submarino, representado na Figura 1.3, é definido como um conjunto de instalações submersas destinadas à elevação, injeção e escoamento de fluidos em um campo de óleo e gás natural (ISO 13628-4, 2010). Bai & Bai (2010) definem como sendo constituído por, ao menos, um poço submarino completado, cabeça de poço no leito marinho, árvore submarina de produção conectada ao sistema de linhas ou dutos de escoamento e os equipamentos submarinos de controle para operar o poço. Em algumas aplicações especiais, os equipamentos submarinos podem ser responsáveis pela separação, compressão e bombeamento dos fluidos produzidos até a unidade de processamento.



Figura 1.3 – Sistema submarino de produção.

Fonte: Petrobras (2015).

Na Figura 1.3 é ilustrado um sistema submarino de produção típico e nela foram identificados os componentes mais importantes. O número 1 indica a Árvore de Natal Molhada (ANM) instalada na cabeça do poço, o 2 é um manifold submarino, o 3 são as linhas flexíveis (podem ser de três tipos: produção, serviço e umbilical de controle eletro-hidráulico) e o 4 é a

unidade estacionária de produção ou plataforma. Além destes, existem diversos equipamentos e subsistemas que compõem o sistema submarino, como o sistema de ancoragem, dutos rígidos, *Pipeline End Termination* (PLET), *Pipeline End Manifold* (PLEM), válvulas de segurança, módulos de distribuição elétrica ou hidráulica, entre outros.

1.2.1 Sistema de controle submarino

Existem diversas formas, já implementadas pela indústria, de realizar o controle do sistema submarino, tais como: hidráulico direto, hidráulico pilotado, hidráulico sequencial, eletro-hidráulico multiplexado e totalmente elétrico. O SCS eletro-hidráulico multiplexado (MUX) tem essa denominação originada do seu princípio de funcionamento. Nesses sistemas é feita a multiplexação do sinal elétrico e hidráulico, possibilitando a unidade estacionária de produção controlar as diversas funções com apenas um canal físico para o sinal elétrico, realizado por um par de fios, e uma linha de suprimento hidráulico. Dessa maneira, há redução significativa, principalmente, no número de linhas hidráulicas interligadas entre a superfície e o equipamento.

O SCS tipo MUX é o empregado usualmente no desenvolvimento da produção dos campos em águas profundas e distantes da unidade estacionária de produção (UEP), tanto para o controle de manifolds como de ANMs. Atrelada a essa característica está a necessidade de menores tempos de resposta na atuação de válvulas, maior quantidade de válvulas a serem controladas – além das presentes nos equipamentos submarinos, há válvulas na coluna de produção, ou seja, no interior do poço – e leitura dos diversos sensores.

O SCS tipo MUX engloba diversas áreas da engenharia, conforme ilustrado na Figura 1.4, e deve-se encará-lo, portanto, como um sistema complexo. Associado a isso está a dificuldade natural de realizar manutenção em qualquer sistema submarino *offshore*, que necessita de logística e alguns recursos exclusivos da área submarina, resultando num tempo de reparo que pode chegar a alguns meses.

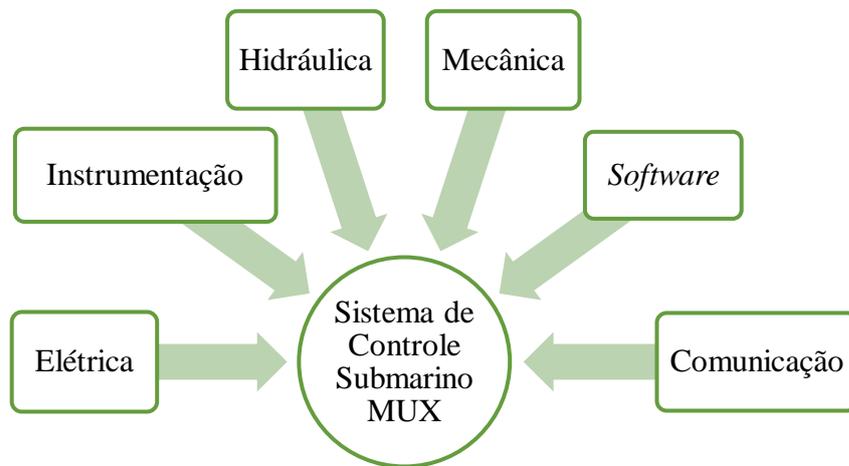


Figura 1.4 – Áreas de conhecimento da engenharia envolvidas no sistema de controle submarino eletro-hidráulico multiplexado.

O SCS MUX possui componentes instalados na superfície, a bordo da plataforma de produção, e no leito marinho, instalados nos manifolds e ANMs. Na Figura 1.5 está a representação esquemática dos principais subsistemas: MCS, EPU, HPU e SCM. Também são necessários equipamentos auxiliares conhecidos como TUTA, EFL, HFL, caixas de distribuição, caixas de junção, conectores, sensores e transdutores submarinos. Na sequência é feita uma breve descrição dos principais equipamentos.

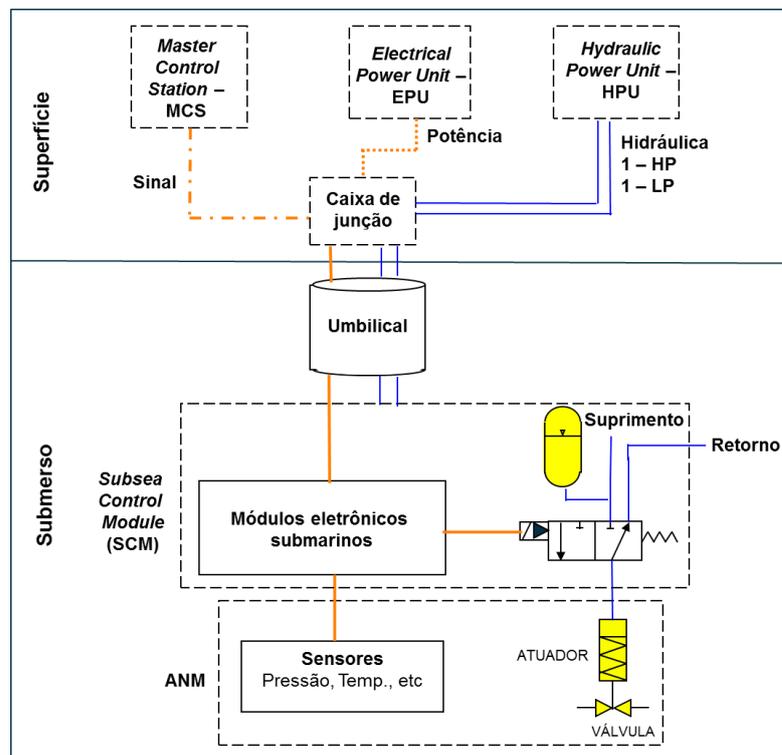


Figura 1.5 – Representação esquemática do sistema de controle MUX.

- MCS: A estação de controle mestre realiza o controle lógico de todo o sistema: equipamentos submarinos e de superfície. É composta basicamente de controladores, por exemplo, CLP ou computadores industriais, módulos de comunicação de redes e módulos de entrada e saída de sinais analógicos e digitais. Além do controle dos equipamentos submarinos faz a integração e comunicação com o sistema supervisor da plataforma.
- EPU: A unidade de potência elétrica é responsável pela alimentação elétrica monofásica das eletrônicas submarinas. Também realiza o último estágio da comunicação entre os equipamentos de superfície e submarinos inserindo, via modulação em frequência ou em amplitude, o sinal de controle no mesmo par de cabos que faz a alimentação elétrica dos equipamentos submarinos. Por conveniência, e dependendo do conceito adotado no projeto do sistema, a MCS e EPU podem estar juntas na mesma estrutura física (cabine ou gabinete).
- HPU: A unidade de potência hidráulica fornece a potência hidráulica para o acionamento das funções dos equipamentos submarinos. Normalmente são entregues em dois níveis de pressão, o mais baixo (LP) é para as funções dos equipamentos, tipicamente acionamento de válvulas, e o nível mais alto (HP) é para as funções dentro do poço.
- SCM: O módulo de controle submarino é responsável por controlar e monitorar os equipamentos submarinos através de sinais elétricos que comandam os acionamentos hidráulicos. É responsável pela multiplexação do sinal elétrico, no trecho submerso do sistema, e faz a comunicação com a superfície através de um único par de cabos, que o mesmo que promove a sua alimentação elétrica.
- EFL e HFL: são o meio físico responsável por transmitir os sinais elétricos (EFL) e hidráulicos (HFL) entre os diversos módulos e equipamentos submarinos. Como as conexões são realizadas dentro da água é preciso conectores adequados para evitar fugas de corrente e curto-circuito nas ligações elétricas ou entrada de água ou partículas sólidas nas linhas hidráulicas.

1.3 Motivação

A indústria é exigida pelo mercado e tem como principal desafio fornecer produtos cada vez mais robustos, confiáveis e complexos. No caso dos sistemas de controle de equipamentos

submarinos os desafios são ainda maiores, visto que ao mesmo momento em que se exigem melhores desempenhos dos componentes, os ambientes de aplicação estão, cada vez mais, em lâminas d'água mais profundas. Dessa forma, prever e analisar a confiabilidade desses sistemas se tornou ainda mais importante e complexo.

A análise da confiabilidade visa facilitar e manter dentro de certos limites as incertezas referentes aos custos envolvidos na exploração dos campos petrolíferos. Isso resultará em informações que auxiliarão as áreas de planejamento, operação e manutenção a realizarem o dimensionamento adequado de recursos necessários para manter a produção e a taxa de utilização dos sistemas em níveis elevados, fazendo com que a lucratividade do negócio seja diretamente afetada.

Estudos nessa área da engenharia também são escassos na literatura científica. Como será constatado na revisão bibliométrica, há poucos trabalhos na área de confiabilidade envolvendo, simultaneamente, sistemas de controle e equipamentos submarinos. Ainda menor é a quantidade dos trabalhos envolvendo os sistemas de controle voltados para a fase de produção dos campos petrolíferos.

A pesquisa aqui proposta também se justifica porque o estudo de confiabilidade gerará insumos necessários para outras avaliações, tais como, estimar o custo de *Operational Expenditure (OPEX)* do sistema submarino de controle, realizar o dimensionamento da quantidade de equipamentos sobressalentes para manter a produção e conduzir os estudos de obsolescência dos componentes, uma vez que as licenças e autorizações legais para produção dos campos de petróleo no Brasil duram de 20 a 30 anos.

1.4 Objetivo

O objetivo principal desta dissertação é modelar e determinar, tanto quantitativamente, como qualitativamente, a confiabilidade de sistemas de controle automáticos de equipamentos submarinos aplicados na produção de óleo e gás e identificar os pontos críticos a serem contornados para que haja incremento e melhoria da confiabilidade do sistema.

Para atingir o objetivo geral proposto serão abordados os seguintes objetivos específicos:

1. Fazer uma revisão bibliográfica sobre os conceitos e as ferramentas de confiabilidade aplicadas na engenharia submarina.

2. Propor um modelo e calcular a confiabilidade de um sistema de controle submarino de poços.
3. Identificar os pontos críticos do sistema.
4. Discutir resultados da abordagem e metodologia adotadas.

1.5 Trabalhos correlatos

O levantamento de trabalhos correlatos anteriores foi realizado na base *Scopus*, acessado a partir do portal Capes (www.periodicos.capes.gov.br), em 27/03/2018. Utilizou-se como parâmetros da pesquisa os termos mostrados na Tabela 1.1 que foram separados em três conjuntos de acordo com a área do conhecimento, sendo que o conjunto A refere-se a confiabilidade, o B a equipamentos submarinos e o C engloba trabalhos nas áreas de elétrica, automação e afins.

Na interseção dos três conjuntos foram encontrados 115 documentos entre artigos de periódicos e conferência, livros e revisão. Depois aplicou-se um filtro para a área de engenharia, visto que alguns termos trouxeram resultados não associados ao escopo da pesquisa, como as áreas das ciências da terra e biológica, resultando num total de 73 trabalhos. Ainda assim, foi realizada uma avaliação dos trabalhos para excluir resultados espúrios de artigos onde não havia ao menos dois termos pesquisados no título ou nas palavras-chaves, sendo um deles, obrigatoriamente, a palavra confiabilidade (e seus tesouros). Feito isso, sobraram 36 trabalhos entre artigos de congresso e periódicos.

Tabela 1.1 – Áreas de conhecimento pesquisadas na base *Scopus*.

ÁREAS DE CONHECIMENTO	IDENTIFICAÇÃO
<i>TITLE-ABS-KEY (reliability assessment) OR TITLE-ABS-KEY (reliability analysis) OR TITLE-ABS-KEY (reliability study)</i>	A
<i>TITLE-ABS-KEY (subsea equipment) OR TITLE-ABS-KEY (subsea production system) OR TITLE-ABS-KEY (subsea control system)</i>	B
<i>TITLE-ABS-KEY (electronic) OR TITLE-ABS-KEY (control) OR TITLE-ABS-KEY (electrical) OR TITLE-ABS-KEY (automation)</i>	C

Dessa lista final só foi possível obter 7 artigos de periódicos. Os demais não estavam mais disponíveis, talvez por serem artigos publicados em conferências e alguns datam das décadas de 1980 e 1990, quando os primeiros trabalhos envolvendo essas áreas foram

publicados. Apesar disso, os artigos obtidos se mostraram relevantes, uma vez que são responsáveis por mais de 66% das citações de todos os 36 trabalhos (86 das 130 citações totais), ou seja, os demais 29 trabalhos juntos foram citados apenas 44 vezes (aproximadamente 34%).

Outra fonte de pesquisas envolvendo essas três áreas do conhecimento foi a *Norwegian University of Science and Technology* (NTNU), especificamente os departamentos de Tecnologia Marítima e Engenharia de Produção e Qualidade, que possuem área de pesquisa voltada para confiabilidade de equipamentos e sistemas *offshore* e submarinos. No site da NTNU foram encontradas 4 dissertações de mestrado envolvendo sempre as áreas de confiabilidade (A) e sistemas e equipamentos submarinos (B), mas não necessariamente sistemas eletrônicos ou de controle (C). Contudo, dado a relevância dos trabalhos todos fizeram parte da revisão bibliográfica estudada na presente dissertação.

Nesta fase de revisão, percebeu-se que a produção científica vinha mantendo um padrão de poucos trabalhos por ano. Até 2009 a média era menor do que uma publicação por ano. Entretanto, entre 2010 e 2016 a média passou para quase 5 por ano. Esse salto repentino ocorrido a partir de 2010 pode estar associado ao acidente ocorrido no Golfo do México, quando uma sonda de perfuração, após a ocorrência de um *blowout*, explodiu e afundou. Além das onze pessoas mortas nesse desastre, o vazamento só foi plenamente interrompido passados mais de oitenta dias do ocorrido, o que causou um vazamento de proporções gigantescas.

Na Tabela 1.2 são mostrados os principais trabalhos pesquisados. As características mais importantes são: o método ou ferramenta de análise de confiabilidade utilizada, a base de dados (baseado em norma, registros históricos de campo, métodos estatísticos, etc.) e o tipo de sistema ou equipamento que foi avaliado.

Tabela 1.2 – Resumo dos trabalhos correlatos.

Autores	Método de Análise	Fonte de dados	Tipo de Sistema	Objetivo
(Cai, Liu, Liu, Tian, Li, et al., 2012)	Cadeia de Markov	Fabricantes e engenheiros experientes	Sistema de controle – BOP	Comparar a confiabilidade de duas topologias que estão sujeitas a múltiplos erros
(Cai, Liu, Liu, Tian, Dong, et al., 2012)	Rede Bayesiana	Não informa	Sistema de controle – BOP	Avaliar confiabilidade
(Dash, 2012)	Rede Bayesiana	OREDA e FIDES	Sistema de produção submarino	Desenvolver método para extrapolar dados de confiabilidade
(Cai et al., 2013)	Rede Bayesiana dinâmica	Não informa	Sistema de controle – BOP	Avaliar desempenho considerando manutenção preventiva e reparo
(Drægebø, 2014)	FMECA, DBC e AAF	OREDA, engenheiros experientes e fornecedores	BOP	Analisar taxas de falhas em campo
(Kim, Chung, & Yang, 2014)	Cadeia de Markov	Dados de campo	BOP	Avaliar disponibilidade
(Vedachalam, Muthukrishna Babu, Ramadass, & Atmanand, 2014)	AAF	Normas e dados de campo	Inversor de frequência submarino	Modelar confiabilidade em diversas configurações
(Bitanov, 2015)	Métodos estatísticos	Dados de campo	SCM	Modelar confiabilidade
(Sætre, 2015)	FMECA, AAF e AAE	Dados da literatura	Sistema de controle – BOP	Analisar funcionalidade e confiabilidade
(Liu, Liu, Cai, Zhang, & Zheng, 2015)	Rede Bayesiana	Dados da literatura	BOP	Analisar confiabilidade na presença de modos de falhas comuns
(Okaro & Tao, 2016)	DBC e modelo de Weibull	OREDA e fornecedores	Sistema de compressão submarino	Analisar confiabilidade do sistema submetido a estresses operacionais

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo traz as definições fundamentais em engenharia de confiabilidade, bem como a teoria por trás das técnicas de análise utilizadas nesta dissertação.

2.1 Confiabilidade

A engenharia de confiabilidade é a disciplina da engenharia que aplica o conhecimento científico a um componente, produto, sistema ou processo com o objetivo de assegurar que este desempenhe sua função pretendida durante um período de tempo em determinado ambiente especificado sem falhar (Kiran, 2017).

Segundo a norma NBR 5462 da ABNT (1994), a definição de confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar a função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo. A análise de confiabilidade visa definir os principais pontos e modos de falha associados aos componentes do sistema e o comportamento estatístico dessas falhas ao longo do tempo. Em outras palavras, seria uma forma de prever o comportamento futuro no desempenho da função requerida.

Em termos matemáticos, considerando a variável aleatória de tempo t como o tempo até ocorrer a falha, tem-se que a função densidade de probabilidade de ocorrência de falha $f(t)$ em um intervalo de tempo específico é definida por:

$$\int_0^{+\infty} f(t)dt = 1 \quad 2.1$$

Sendo $F(t)$ a função de probabilidade acumulada de falha, de acordo com o apresentado em (Ren, Chen, & Chen, 2017), tem-se:

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

Ou seja, $F(t)$ expressa a probabilidade de ocorrer a falha até o tempo t (Rausand & Høyland, 2004).

Tendo o conceito oposto ao da falha, a confiabilidade é calculada pela subtração da não confiabilidade (falha). Uma vez que um componente ou equipamento só pode admitir um desses dois estados: ou está operando adequadamente ou está no estado de falha, esses estados são mutuamente exclusivos, logo a confiabilidade $R(t)$ pode ser expressa por (Rausand & Høyland, 2004):

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad 2.3$$

De outro modo, a função matemática da confiabilidade pode ser obtida a partir da Equação 3.1 dividindo-a em dois intervalos de tempo, sendo t o tempo até a falha acontecer.

$$\int_0^t f(t)dt + \int_t^{+\infty} f(t)dt = 1 \quad 2.4$$

Na Equação 3.4 o primeiro termo representa a probabilidade de falha, conforme descrito na Equação 3.2, e o segundo representa a probabilidade que o componente se mantenha em operação a um dado intervalo de tempo, ou seja, que não falhe até o tempo t . Portanto, para a confiabilidade, tem-se:

$$R(t) = \int_t^{+\infty} f(t)dt \quad 2.5$$

A Equação 3.5 representa a probabilidade de determinado componente não falhar até o tempo t . Sendo $f(t)$ a função densidade de probabilidade de falha da variável aleatória e t é a variável que representa o tempo até a falha.

Do ponto de vista técnico, a confiabilidade depende de vários fatores como a qualidade, a idade dos componentes e a complexidade do sistema analisado. Ela fornece informações probabilísticas sobre o comportamento do sistema no futuro, baseando em informações probabilísticas sobre o comportamento do sistema no passado, ao longo do tempo e dos componentes. Para a determinação da confiabilidade é relevante considerar o tempo de utilização do sistema, as características do ambiente, assim como as condições de utilização e o desempenho (Lafraia, 2001).

2.2 Taxa de Falha

Uma falha ocorre quando um sistema, equipamento ou componente não consegue executar a sua função definida no projeto. Há duas categorias básicas de falhas em equipamentos: as aleatórias e as sistemáticas. Uma falha aleatória é aquela causada pelos mecanismos de degradação natural quando se assume que o componente opera dentro das condições definidas em projeto, enquanto que uma falha sistemática pode estar relacionada a

uma causa particular, como estresse excessivo, falha de projeto, erro humano, dentre outras (Hauge, Håbrekke, & Lundteigen, 2010).

A função de taxa de falha pode ser considerada a medida de confiabilidade mais difundida na prática. Essa função pode ser interpretada como a quantidade de falhas de um item após passado o tempo t e é utilizada na análise do risco a que uma unidade está exposta ao longo do tempo, servindo como base de comparação entre unidades com características distintas (Fogliatto & Ribeiro, 2009).

Considerando a probabilidade de falha de um item num intervalo de tempo entre t e $t+dt$ e a taxa de falha sendo representada por λ (lambda), pode-se afirmar que a probabilidade de falha nesse intervalo será (Smith, 2001):

$$\lambda(t)dt$$

Considerando-se um intervalo de tempo dt infinitesimal ($dt \rightarrow 0$), a probabilidade de falha é:

$$f(t)dt$$

A probabilidade de falha no intervalo de t até $t+dt$ será a probabilidade condicional de falha dado que no tempo t não houve, sendo a não ocorrência de falha definida anteriormente como confiabilidade $R(t)$ (Smith, 2001). Assim, chega-se em:

$$\lambda(t)dt = \frac{f(t)dt}{R(t)} \quad 2.6$$

Portanto, a taxa condicional de falha é representada matematicamente por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad 2.7$$

A unidade de medida é normalmente dada em termos de falhas por unidade de tempo. A forma da função taxa de falha é um indicativo da maneira como o componente envelhece, conforme exemplo da Figura 2.1. Sendo assim, é possível fazer uma distinção em três classificações básicas para a função de taxa de falha, descrito em (Fogliatto & Ribeiro, 2009): função crescente, decrescente e constante ou estacionária.

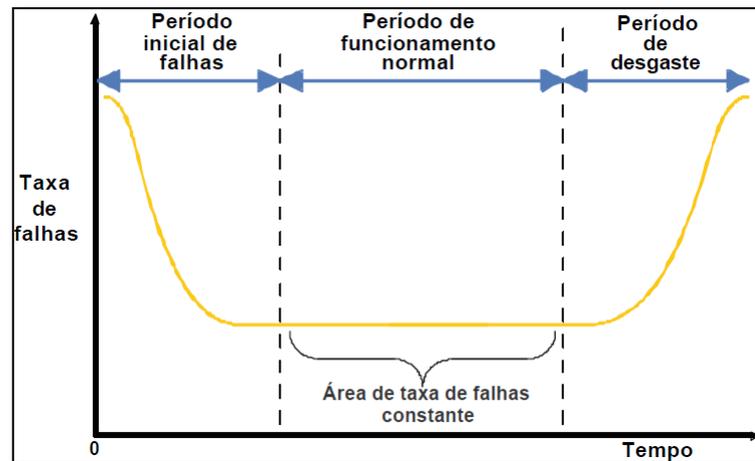


Figura 2.1 – Curva da banheira.

Fonte: Torell & Avelar (2004).

Na Figura 2.1 está representada a curva da banheira que ilustra as fases da vida de um item: mortalidade infantil onde a taxa de falhas é decrescente, período de vida útil com falhas constantes e envelhecimento com taxa de falhas crescente. Apesar de ser uma curva bastante utilizada, sua aplicação só é válida para componentes individuais.

2.3 Confiabilidade de Sistemas

Avaliar a confiabilidade de sistemas é uma tarefa complexa por envolver um conjunto de componentes e subsistemas para desempenhar um conjunto de funções. Na Figura 2.2 são mostradas as quatro dimensões que influenciam na análise de confiabilidade e os principais fatores em cada uma delas. Essa análise é uma medida de qualidade importante pois está relacionada às características do sistema ao longo do tempo e, de acordo com a abordagem em (Khan, 2001), tem efeito direto na lucratividade da companhia.

Uma alternativa para aumentar a confiabilidade de um sistema sem necessitar de nenhuma alteração na confiabilidade dos componentes individuais que o integram é utilizar a redundância, que pode ser de todo o sistema ou dos componentes mais críticos. No entanto, em caso de um problema de falhas de modo comum, a redundância pode não surtir o resultado desejado na confiabilidade do sistema, ou seja, não aumenta-la (Lafraia, 2001).

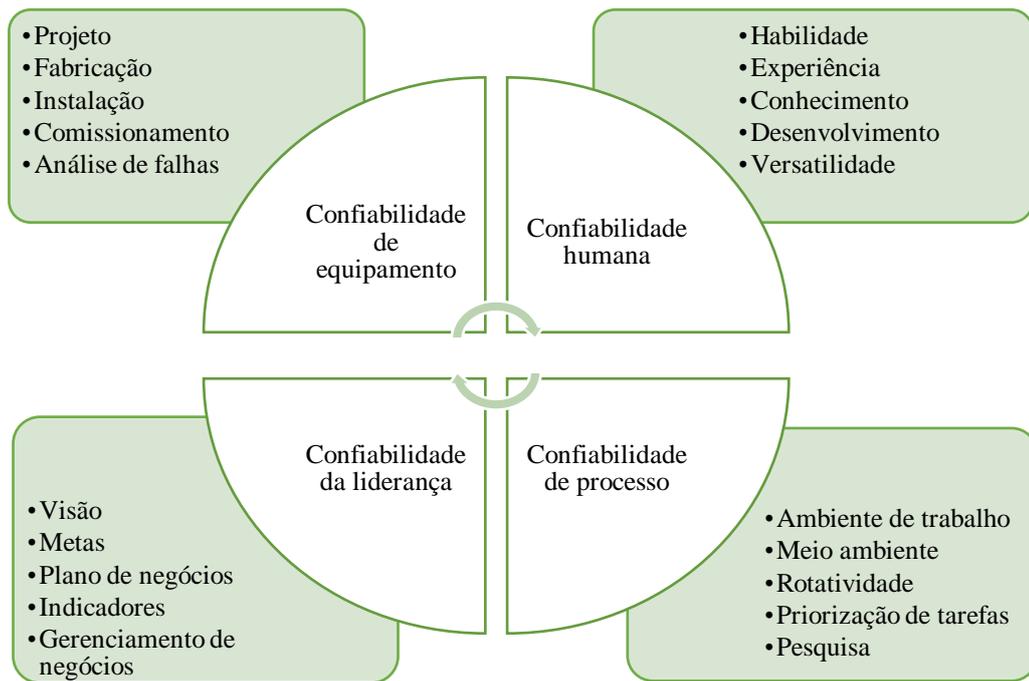


Figura 2.2 – Fatores que influenciam a análise de confiabilidade.

Fonte: adaptado de (Khan, 2001).

É importante ter em mente que o aumento da confiabilidade através de redundância adiciona outras características que deverão ser avaliadas, tais como: custo financeiro, maior peso e dimensão do sistema, necessidade de componentes sobressalentes, custos mais altos com manutenção corretiva e preventiva e maior consumo de energia. Cada uma dessas características contribui substancialmente para o custo global da instalação (Smith, 2001).

2.4 Técnicas aplicáveis à análise de confiabilidade

Em cada fase do ciclo de vida de uma instalação industrial deve ser avaliada a adequação quanto à aplicação de técnicas de engenharia de confiabilidade. Essas práticas e metodologias não devem ser aplicadas de forma isolada, uma vez que o produto de uma pode ser insumo de outra ao longo do ciclo de vida de um produto ou sistema (Jordán, 2016). Sendo que, as técnicas e metodologias aplicadas devem ser documentadas adequadamente, mantendo o histórico ao longo de todas as fases do ciclo de vida de um sistema.

Uma avaliação de confiabilidade deve ser realizada e documentada considerando-se as necessidades da instalação em atender os requisitos funcionais ou as metas de desempenho. O escopo e a profundidade dos estudos, que devem ser realizados, dependem das condições específicas de cada instalação. A definição dos objetivos deve ser voltada para o que importa

para a operação que, normalmente, exige o cumprimento de um dos requisitos: diminuição do *downtime* (maior disponibilidade), aumento da confiabilidade (tempo maior sem falhas), eliminar ou diminuir acidentes ou incidentes e eliminar ou diminuir impactos ambientais (Jordán, 2016).

Para cada fase do ciclo de uma instalação, sistema ou equipamento o ideal é aplicar pelo menos uma técnica metodológica na análise de confiabilidade. Nos itens a seguir são definidos e descritos sucintamente o diagrama de blocos de confiabilidade e a árvore de falha que são as técnicas utilizadas neste trabalho. Mais informações sobre estas ferramentas podem ser consultadas nas referências.

2.4.1 Diagrama de blocos de confiabilidade (DBC)

O DBC é uma ferramenta que permite estudar o impacto da topologia na confiabilidade global do sistema. Cada item ou subsistema é representado na forma de um bloco, com a sua respectiva confiabilidade, e a inter-relação com os demais blocos do sistema é indicada pela forma e ordem de conexão entre eles. Essa representação gráfica resulta em um conjunto de blocos que podem estar associados em série, paralelo ou em condições mais complexas da relação dos componentes (Calixto, 2013). Como exemplo, na Figura 2.3 está a representação de um sistema em série e outro em paralelo.

De acordo com a (2016), o DBC é uma representação gráfica e lógica de um sistema que mostra como os estados de sucesso de seus componentes, representados por blocos, e suas combinações afetam o estado de sucesso do sistema. Dessa forma, o DBC também permite identificar a importância relativa de um item.

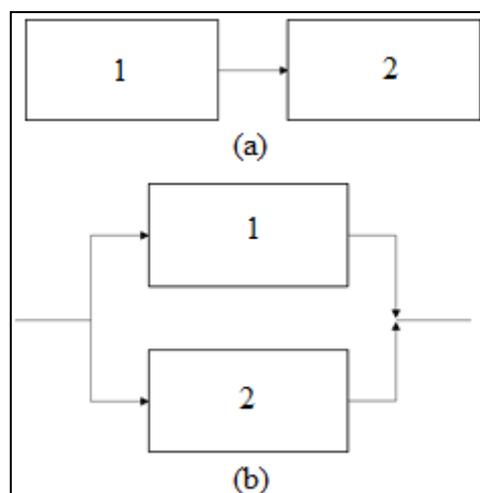


Figura 2.3 – Sistema série (a) e paralelo(b).

No exemplo dado na Figura 2.3(a) os blocos indicam sistema em série, em termos de confiabilidade. Dessa forma, a confiabilidade resultante do sistema é descrita matematicamente, por Calixto (Calixto, 2013), como:

$$R(t) = R1(t).R2(t) \quad 2.8$$

Já no exemplo da Figura 2.3(b), a confiabilidade do sistema está em paralelo e é descrita matematicamente, por Calixto (Calixto, 2013), como:

$$R(t) = 1 - ((1 - R1(t)).(1 - R2(t))) \quad 2.9$$

Os diagramas de blocos de confiabilidade são adequados para sistemas de componentes não reparáveis e onde a ordem na qual as falhas ocorrem não importa (Drægebø, 2014). O DBC é construído para uma função específica do sistema e os componentes identificados como necessários para desempenhar esta função são representados. Nesse sentido, tais componentes são considerados relevantes em relação a confiabilidade dessa função do sistema.

Isso significa que o DBC construído para uma função pode não contemplar componentes que façam parte do sistema, simplesmente porque para aquela função específica aquele componente pode ser considerado irrelevante. Por outro lado, o mesmo componente, ora considerado irrelevante, poderá ser altamente relevante em relação a outra função do sistema.

Nessa técnica cada bloco representa os dados de entrada da probabilidade de sucesso do componente no desempenho da função analisada. Dessa maneira, esses dados são sempre as probabilidades de sucesso, isto é, a confiabilidade. No entanto, deve-se enfatizar que essa representação de blocos não indica a conexão física dos componentes.

2.4.2 Análise de árvore de falha (AAF)

A análise de árvore de falha ou *Fault Tree Analysis* (FTA) é um método analítico de análise de confiabilidade e permite uma análise qualitativa ou quantitativa, dependendo do escopo e dos objetivos do estudo. Uma árvore de falhas é uma representação gráfica organizada das condições e fatores que causam ou contribuem para a ocorrência de um resultado indesejado, designado como evento de topo. Portanto, é um método de análise dedutivo, realizado de cima para baixo, que visa identificar as causas ou combinações de causas que podem levar ao evento topo previamente definido, ou seja, a falha (IEC 61025, 2006).

A modelagem gráfica é feita através de combinações em série ou paralelo que podem levar ao evento topo. As portas lógicas são a primeira representação abaixo do evento topo e

estão interligadas às causas possíveis. A partir daí, cada causa possível é investigada e refinada até que as causas básicas da falha sejam compreendidas. Assim, a árvore de falhas será estruturada em níveis, os quais deverão ser construídos de cima para baixo. No entanto, vários ramos de uma árvore de falha podem ser construídos para alcançar diferentes níveis de granularidade (Xing & Amari, 2008). Ou seja, a árvore pode ter diversos níveis chegando até o nível mais baixo dos subcomponentes como, por exemplo, transistores. Isso dependerá do objetivo da análise e dos dados disponíveis para o estudo.

A AAF pode ser aplicada em sistemas e instalações existentes, em operação ou naqueles ainda em fase de concepção conceitual do projeto. Os objetivos mais comuns dessa análise são (Čepin, 2011): avaliar a probabilidade de falha do sistema ou de uma função específica, comparar diferentes topologias do sistema na fase de projeto, identificar os componentes mais importantes em termos de confiabilidade e melhorar a documentação do sistema aumentando o conhecimento sobre o seu comportamento.

2.5 Medidas de importância de componentes

A identificação de deficiências e dos elos mais frágeis da confiabilidade de um sistema pode ser feita através de medidas quantitativas da importância dos componentes. Através dessas medidas pode-se melhorar o sistema incluindo redundância aos componentes críticos, por exemplo. Analogamente, a engenharia de manutenção pode estabelecer uma lista de prioridades para as inspeções preventivas (Fogliatto & Ribeiro, 2009).

As medidas de importância mais utilizadas na literatura são: medida de Birnbaum, potencial de melhoria, importância crítica e medida de Fussel-Vesely. As diversas medidas são baseadas na interpretação, ligeiramente diferente, do conceito de importância do componente. Intuitivamente, a mensuração de importância do componente depende de dois fatores: a localização no sistema e a confiabilidade do componente avaliado (Rausand & Høyland, 2004).

A medida de Birnbaum, $I^B(i|t)$ na Equação 3.10, é definida como a derivada parcial da confiabilidade do sistema, $\partial R_S(r(t))$, em relação à confiabilidade do componente i ($\partial R_i(t)$), conforme equação abaixo e descrito em (Rausand & Høyland, 2004):

$$I^B(i|t) = \frac{\partial R_S(r(t))}{\partial R_i(t)} \quad 2.10$$

Isso implica que para $I^B(i|t)$ com valor alto, uma pequena variação na confiabilidade componente i resultará em uma mudança maior na confiabilidade do sistema no tempo t (Rausand & Høyland, 2004).

A medida de importância crítica, representada por $I^{CR}(i|t)$ na Equação 3.11, corresponde à probabilidade condicional de o sistema estar em um estado em que o componente i é crítico e está inoperante em um tempo t , dado que o sistema está inoperante em t (Fogliatto & Ribeiro, 2009). Essa medida é calculada, como pode ser observado na Equação 3.11, a partir da medida de Birnbaum ($I^B(i|t)$) multiplicada pela não confiabilidade do item i e dividida pela não confiabilidade do sistema.

$$I^{CR}(i|t) = \frac{I^B(i|t)[1 - R_i(t)]}{1 - R_S(r(t))} \quad 2.11$$

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os materiais, ferramentas, softwares e métodos empregados no desenvolvimento da pesquisa, bem como, a ordem de execução de cada etapa. A metodologia buscou elucidar a seguinte questão-problema: qual é a confiabilidade, os pontos críticos do sistema e os modos de falhas mais prováveis de acontecer durante a fase de operação de um sistema de controle eletro-hidráulico multiplexado submarino, analisado através das técnicas de diagrama de blocos e árvore de falha.

3.1 Classificação da pesquisa

Essa pesquisa pode ser classificada como aplicada sob o ponto de vista de sua natureza por objetivar a aplicação prática direcionada à solução de problemas específicos, através de pesquisa bibliográfica de dados disponíveis. Quanto à forma de abordagem é quantitativa por expor em números os resultados das análises realizadas e exploratória-descritiva de acordo com os objetivos propostos (Gil, 2009).

3.2 Análise funcional e de confiabilidade do sistema

O primeiro passo metodológico foi fazer a análise funcional de um sistema de controle multiplexado de poços submarinos. Essa análise forneceu insumos necessários para o desenvolvimento das fases seguintes e trouxe melhor conhecimento do sistema permitindo, entre outros pontos:

- Identificar e descrever as funções mínimas necessárias;
- Identificar as formas pelas quais o sistema pode falhar;
- Descrever as interfaces de entrada e saída requeridas para o funcionamento do sistema.

As técnicas de análise utilizadas foram o diagrama de blocos de confiabilidade (DBC) e a análise de árvore de falha (AAF). Essas ferramentas foram utilizadas em diversos trabalhos, como foi visto na revisão de trabalhos anteriores que foi apresentada na seção 1.5. Além disso, a aplicação dessas duas técnicas foi promovida porque cada uma traz resultados complementares, que são: o entendimento do impacto da topologia do sistema (DBC) e a identificação do conjunto mínimo de causas que levem ao evento topo (AAF).

Para representar as características de falhas dos equipamentos aqui estudados, foi utilizada a distribuição exponencial. Essa distribuição é bastante presente nos estudos de sistemas eletrônicos porque é definida apenas pelo parâmetro de taxa de falha constante, dessa

forma, representa matematicamente a região de vida útil de operação do componente (Lafraia, 2001). A taxa de falha constante não considera o efeito de mortalidade infantil ou envelhecimento do item, ou seja, as falhas são aleatórias e a probabilidade de falha é a mesma a qualquer tempo durante operação.

A Figura 3.1 representa o fluxograma com as macro etapas seguidas no desenvolvimento da pesquisa. O primeiro passo foi a pesquisa geral sobre o tema e a revisão bibliográfica sobre os conceitos fundamentais de engenharia de confiabilidade e de sua aplicação na área de equipamentos submarinos. A fase seguinte foi realizar uma análise funcional do sistema em questão e definir as funções a serem analisadas em termos de confiabilidade. A modelagem e análise do sistema em relação à confiabilidade utilizando as técnicas de diagrama de blocos e a análise por árvore de falha foram executadas na sequência. Nesse momento foi fundamental os dados de taxa de falha para realização dos cálculos.

Em paralelo às etapas citadas anteriormente, foi feita uma pesquisa documental para se obter os dados de taxa de falha dos componentes do sistema submarino. A fonte e o detalhamento dos dados utilizados serão descritos com mais detalhes na seção 3.4.

Por fim, os resultados foram analisados e se fez uma avaliação crítica de modo a identificar eventuais falhas na execução das fases anteriores como, por exemplo, na elaboração dos modelos ou no tratamento dos dados. Quando necessário as correções foram feitas e o resultado final revisado.

O desenvolvimento do modelo de confiabilidade em diagrama de bloco é, basicamente, o modelo de desempenho da função em termos de confiabilidade. O resultado da confiabilidade do sistema será calculado a partir da simplificação dos blocos até se obter um único objeto que representará a confiabilidade total do sistema.

As medidas de importância de confiabilidade utilizadas na análise por DBC são as medidas de Birnbaum e importância crítica. A medida de Birnbaum tem por objetivo identificar o componente a ser melhorado de forma a permitir incremento da confiabilidade do sistema. Enquanto que a importância crítica pretende identificar o componente com maior probabilidade de ser o causador de uma falha quando o sistema estiver inoperante (Rausand & Høyland, 2004). Na seção 2.5 foi feita uma breve descrição dessas medidas.

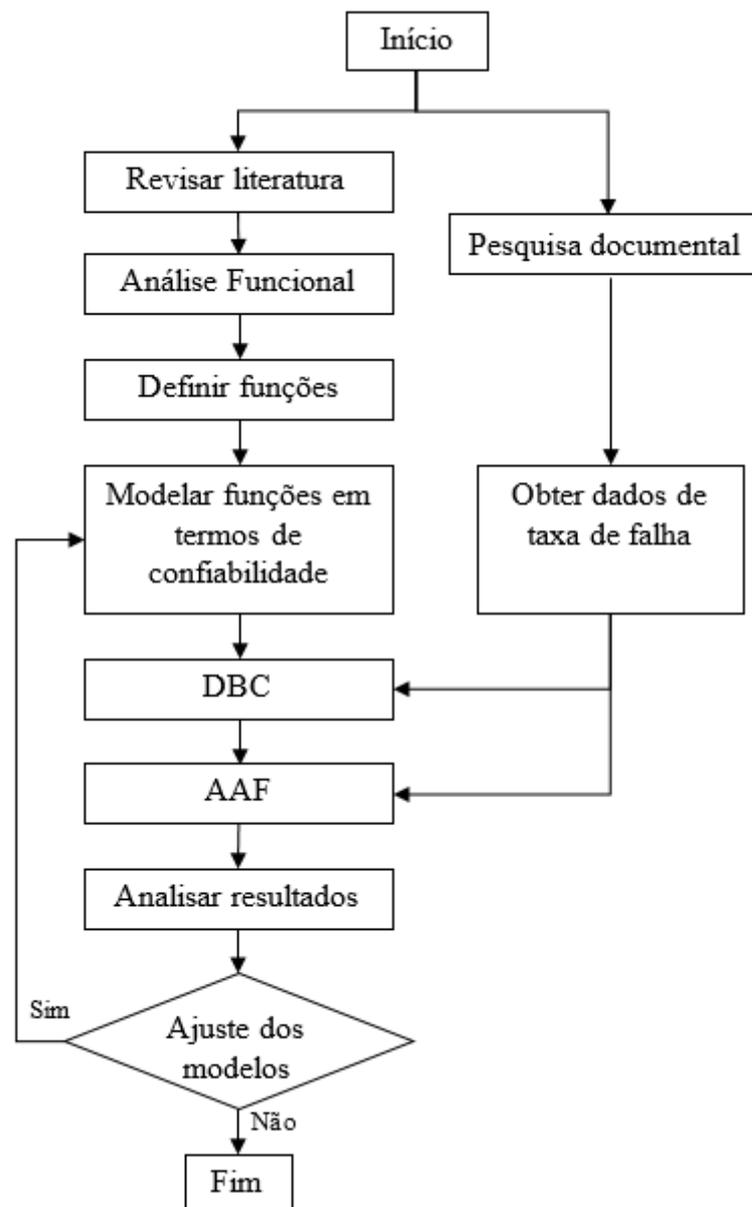


Figura 3.1 – Fluxograma do procedimento metodológico adotado.

A execução da análise através da árvore de falha seguirá o fluxo mostrado na Figura 3.2 e será feita com auxílio do *software* R. O evento topo considerado foi a Falha no Controle do Poço. A análise quantitativa calculou numericamente para o período de aproximadamente três anos de operação, a partir de dados taxa de falha que foram considerados constantes, assim como na análise por DBC.

A análise qualitativa da árvore de falha buscou identificar os eventos básicos que quando ocorrem levam ao evento topo. A soma dos produtos desses eventos básicos identificados integra o conjunto mínimo de corte ou *minimal cut sets* (Čepin, 2011). Um conjunto pode ser

formado por um ou mais elementos, sendo que quanto maior a quantidade de eventos básicos presente no conjunto, menor será a probabilidade de falha.

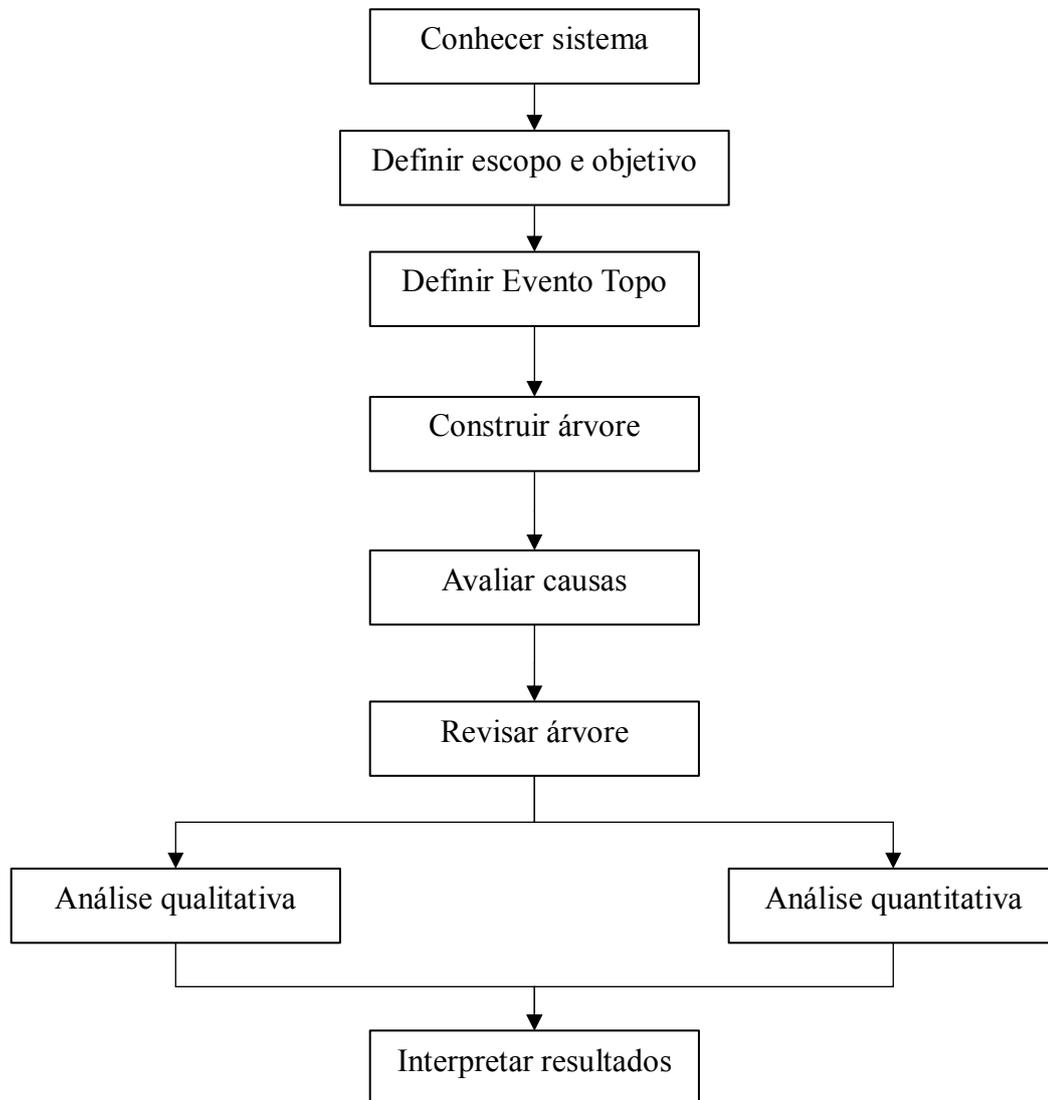


Figura 3.2 – Fluxo de processo para construção de árvore de falhas.

Fonte: Adaptado de (Lin, Yuan, & Zhang, 2014).

Por fim, na avaliação dos resultados fez-se uma análise crítica dos produtos obtidos no estudo. Nesse momento verificou-se os resultados e sua convergência do ponto de vista técnico e funcional do sistema. Além disso, essa avaliação permitiu extrair informações que possam ser utilizadas para incrementar o desempenho do sistema em relação a sua confiabilidade através do estabelecimento de recomendações e ações de melhoria nas diversas fases da vida do sistema: especificação, projeto, fabricação e montagem, operação e manutenção.

3.3 Softwares

Para implementar o cálculo de confiabilidade via DBC foi utilizado o *software Modellus*, na sua versão X 0.4.05 para Windows, disponível em <http://www.modellus.co/>. Essa ferramenta foi escolhida por ser gratuita e permitir a criação de modelos com equações matemáticas utilizando a notação matemática padrão. Dessa maneira, a modelagem via DBC foi realizada fazendo-se as simplificações dos blocos através de sistemas série-paralelo até se atingir o equivalente do sistema para um único bloco. As equações, juntamente com os dados de taxas de falhas, foram inseridas no *Modellus* para se obter o desempenho da confiabilidade em função do tempo. As equações e dados utilizados são mostradas detalhadamente no capítulo 4 e no Apêndice A.

Com o intuito de fazer uma melhor apresentação gráfica do resultado obtido, os dados de saída resultantes da análise da confiabilidade no tempo foram exportados para um aplicativo de planilhas eletrônicas onde foram editados os gráficos com as curvas de confiabilidade por tempo de operação do sistema.

A representação gráfica e cálculos do modelo de confiabilidade através da árvore de falhas foi feita com a utilização do *software R* versão 3.4.1 para Windows. R é um *software* livre, construído baseado em uma linguagem desenvolvida para análise e computação estatística e gráfica, mantido pela organização sem fins lucrativos *R Foundation* (R Core Team, 2017). Este software, bem como seu manual, pode ser obtido no endereço <https://www.r-project.org>.

Para análise de árvore de falhas foi preciso obter um pacote adicional para o R, denominado *FaultTree* em sua versão 0.2.8 revisão 71, que foi desenvolvido por Silkworth (2017). Nessa ferramenta, uma árvore de falhas é construída a partir de um *script* de tal forma que cada nó da árvore é descrito por entrada de linha de comando. A visualização da árvore pode ser feita continuamente durante o desenvolvimento da árvore por um comando definido, diferente das ferramentas que possuem interface gráfica.

3.4 Coleta de dados de falha

O projeto *Offshore and Onshore Reliability Data* foi iniciado em 1981 com a colaboração da *Norwegian Petroleum Directorate* que teve, posteriormente, seu nome alterado para *Petroleum Safety Authority Norway* (Oreda, 2015). Em 1983 foi estabelecido um grupo de cooperação constituído de várias companhias da área de óleo e gás e o escopo da OREDA passou a englobar uma faixa mais ampla de equipamentos de superfície e submarinos utilizados na exploração e produção de óleo e gás (Oreda, 2015).

O objetivo principal do OREDA é contribuir para melhorias na concepção e na operação de sistemas e facilidades no setor de óleo e gás seguras, rentáveis e eficientes. Isso é subsidiado por um banco de dados de confiabilidade para análises de projetos, operacionais e de manutenção, além de permitir a troca de informação desses dados entre as companhias participantes do projeto (Oreda, 2015).

Os equipamentos e sistemas submarinos cobertos por esse banco de dados são: sistemas de controle, linhas flexíveis ou *flowlines*, *manifolds*, dutos, *risers*, ferramentas de lançamento e instalação, *templates* e ANMs. A Tabela 3.1 traz a quantidade de unidades de cada um desses tipos de equipamentos e a quantidade de horas em serviço divulgados na edição mais recente.

Pelos dados informados na Tabela 3.1 pode-se inferir a importância dos sistemas de controle na engenharia submarina, pois representam o segundo maior em número de unidades registradas e no somatório de horas em operação. A coluna tempo de serviço também reforça a relevância do banco de dados utilizados, visto que o tempo de $19,4786 \times 10^6$ h equivale a aproximadamente 2.223 anos em operação.

Tabela 3.1 – Dados acumulados divulgados pela OREDA em 2015.

Sistema	Classe de Equipamento	Nº de unidades	Tempo de serviço acumulado (10^6 h)
Submarina (<i>subsea</i>)	Sistemas de controle	505	19,4786
	<i>Flowlines</i>	653	25,7847
	<i>Manifolds</i>	217	9,2619
	Dutos	97	2,9551
	<i>Risers</i>	352	15,0987
	Ferramentas de lançamento	30	1,3702
	<i>Templates</i>	23	1,1632
	ANM	482	18,803
TOTAL SUBSEA		2359	93,9154

Fonte: Adaptado de (Oreda, 2015).

A principal informação para o estudo é a taxa de falhas dos componentes. No OREDA a coleta dos dados é feita durante a vida útil ou uso real no campo dos equipamentos, logo a taxa de falha tende a se aproximar de um valor constante. Isso ocorre porque nesse ponto a qualidade do componente atingiu a maturidade e as falhas que ocorrem passam a ser originadas de causas aleatórias intrínsecas (Torell & Avelar, 2004).

Adicionalmente, pode-se considerar que os equipamentos submarinos são submetidos nas fases de qualificação dos componentes, de fabricação e testes de integração a rígidos requisitos de desempenho e controle de qualidade, portanto é aceitável considerar que as falhas na fase de vida inicial sejam bastante reduzidas. Essa característica reforça a premissa de taxa de falhas constante adotada.

A OREDA, por recolher dados de diversas instalações, faz um tratamento estatístico para estimar a taxa de falhas devido as multi-amostras das diversas instalações, que foram submetidas as diferentes condições operacionais e ambientais. Nesse caso, o cálculo usual de taxa de falha para amostras homogêneas dividindo o número de falhas pelo tempo total em serviço pode não trazer um resultado adequado (Oreda, 2015).

Dessa forma, será utilizado o dado médio de taxa de falha, medido por 10^6 horas, estimado com um intervalo de confiança de 90%. Cabe destacar que a metodologia adotada pela OREDA para a estimação da taxa de falha não faz parte do escopo de discussão desse trabalho. Mais informações podem ser consultadas em (Oreda, 2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será descrito o funcionamento do sistema de controle submarino objeto de estudo deste trabalho e serão apresentados os resultados obtidos a partir da modelagem e cálculo da confiabilidade através do diagrama de blocos e da árvore de falhas.

4.1 Visão sistêmica do sistema de controle submarino multiplexado

O SCS tipo MUX deve desempenhar, primordialmente, a função de controlar a produção de óleo e gás. Numa visão mais profunda, essa função pode ser subdividida em duas: acionamento das válvulas e fornecimento ao processo de dados de pressão, temperatura, vazão, etc. Como o objetivo fim do SCS é controlar a produção e, para tanto, as funções de acionamento de válvulas e leitura de sensores são necessárias ao mesmo tempo, a análise de confiabilidade será feita sob esse ponto de vista.

O SCS aqui estudado é do tipo eletro-hidráulico multiplexado e envolve equipamentos instalados nas plataformas de produção e no leito marinho. Na superfície os equipamentos são, basicamente, a MCS e a EPU, e na região submersa os SCMs, sensores e elementos de conexão elétrica e hidráulica. A Figura 4.1 apresenta um diagrama de blocos funcional dos principais equipamentos que compõem o sistema.

Portanto, foi analisado o SCS MUX projetado para operar até cinco poços, produtores ou injetores, com o mesmo conjunto de equipamentos na superfície (MCS e EPU). Tais poços podem estar localizados a uma distância de mais de 10 km da plataforma, somando-se as distâncias vertical (LDA) e horizontal, isso é um pouco maior que o comprimento total do UEH.

Ressalta-se que os elementos da Figura 4.1 com contorno tracejado indica que esse bloco não faz parte do escopo desse estudo. Isso foi feito porque esses componentes representam o meio físico de transmissão elétrica e hidráulica (TUTA e UEH) e o elemento final de controle (válvulas da ANM). Logo, os dados de confiabilidade das válvulas submarinas e dos cabos elétricos e mangueiras hidráulicas estão fora dos insumos para a análise.

O MCS também tem a função de monitorar dados externos ao SCS que são de interesse ao adequado funcionamento do sistema. São dados referentes às linhas de suprimento da HPU, a comunicação com o sistema de controle descentralizado (DCS) da plataforma, o recebimento de sinais de emergência (ESD), etc. Entretanto, esses sistemas e interfaces também não foram considerados na análise.

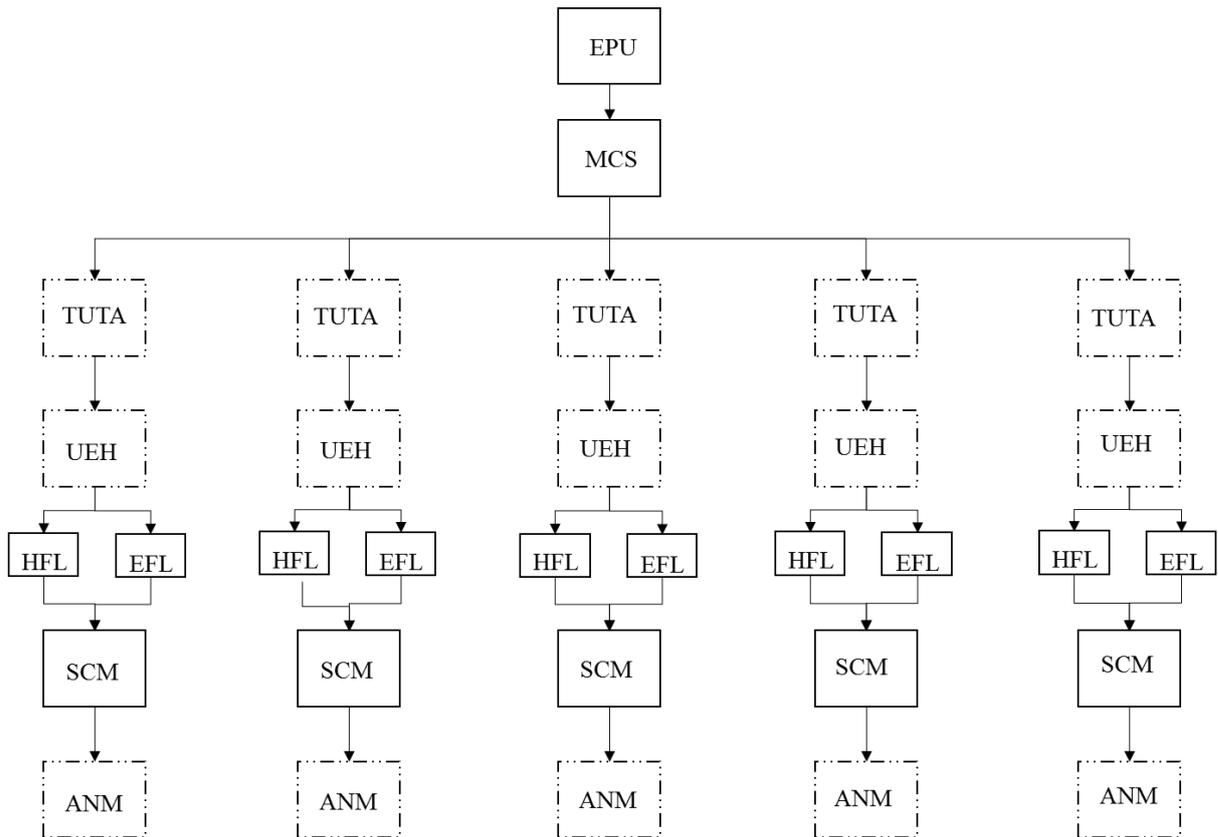


Figura 4.1 – Diagrama de blocos funcional do sistema estudado.

Apesar de omitido na Figura 4.1, o sistema de controle submarino conta com redundância em *hot stand-by* dos principais componentes, sendo eles: MCS, EPU, suprimento elétrico e hidráulico, via UEH e EFL de entrada, SEM e sensores internos de pressão. Os demais componentes, por limitação da topologia prevista no projeto não apresentam redundância, como, por exemplo, o circuito de retorno das funções hidráulicas internas no SCM.

Para diferenciar componentes redundantes e facilitar as atividades de instalação, manutenção e operação é usual fazer a distinção dos equipamentos e componentes atribuindo-lhes as letras A e B no código identificador do equipamento. Por exemplo, para um conjunto de MCSs operando em redundância num determinado sistema, um será denominado por MCS-A e outro por MCS-B.

Na superfície a EPU e a MCS são usualmente conjugadas e montadas num mesmo painel, economizando espaço, e ficam instaladas nos locais específicos projetados para receber todos os painéis de controle dos sistemas instalados a bordo. Entretanto, a operação do sistema é feita remotamente através da sala de controle. Essa facilidade é possível porque há um canal de comunicação entre a MCS e o DCS da unidade de produção. Assim, quando o operador

necessita executar alguma ação ou acompanhar certa variável, o faz através da interface construída no sistema supervisorio da plataforma.

A Figura 4.2 traz uma arquitetura típica de uma MCS e EPU. No MCS é possível identificar a conexão com o sistema de emergência da plataforma realizada através dos sinais de ESD e a conexão do DCS com o servidor de dados do sistema de controle submarino. É através desse canal de comunicação que os dados são levados até a sala de operação e aos bancos de dados corporativos, em nível mais alto do sistema de automação.

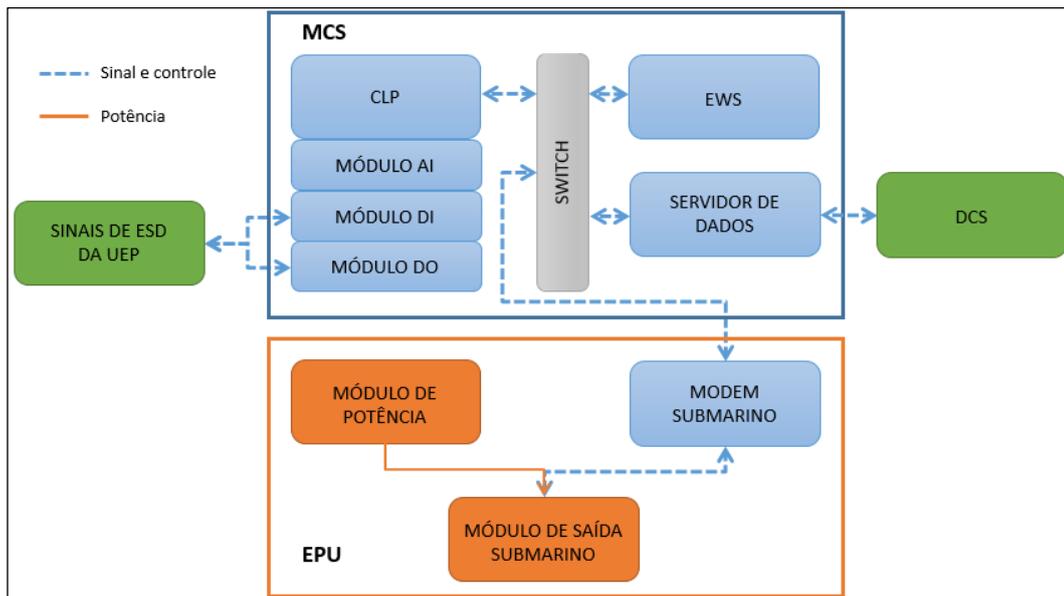


Figura 4.2 – Arquitetura típica de uma MCS e EPU.

A EWS é basicamente um computador industrial com todos os *softwares* necessários para o comissionamento, operação, manutenção, configuração e alteração dos parâmetros dos componentes, lógicas de controle, rede de comunicação, sistema supervisorio, etc.

Na EPU estão os modems individuais de cada poço. Esse modem envia o sinal de comunicação e controle para o módulo de saída, assim como o módulo de potência mantém a tensão e corrente na linha submarina nos níveis adequados para funcionamento do SCM. O módulo de saída submarino realiza a multiplexação do sinal e potência elétrica e dele sai o par de cabos que é interligado ao UEH, que se conecta aos equipamentos submarinos.

O SCM é o equipamento submarino mais importante. Ele é composto de componentes mecânicos, hidráulicos e elétricos, e é responsável por executar todas as instruções nos elementos finais de controle (válvulas e atuadores) e obter dados de sensores internos e externos

ao sistema de controle. Os sensores são ditos internos quando pertencem ao próprio SCS, por exemplo, os sensores de pressão posicionados nas saídas hidráulicas do SCM para acionar as funções hidráulicas. Já os sensores externos são aqueles destinados a obter dados do processo, ou seja, estão associados às variáveis de produção (pressão, temperatura, vazão, corrosão, etc.) e podem estar localizados nos equipamentos submarinos ou no interior do poço (coluna de produção).

A Figura 4.3 representa a arquitetura funcional dos componentes eletrônicos do SCM. De modo simplificado, o SCM pode ser subdividido em: transformador de entrada e SEM. O transformador realiza a adequação da tensão de transmissão para o nível de funcionamento dos componentes eletrônicos. A SEM, através do filtro, faz a demultiplexação do sinal para extrair os comandos e instruções a serem executadas.

A eletrônica submarina é composta basicamente de uma CPU, que trata os dados e executa a lógica e instruções, um modem para comunicação com a superfície e os cartões entrada analógica (AI) e saídas digitais (DO). Os cartões de AI são responsáveis por obter os dados gerados pelos sensores submarinos, enquanto que os cartões DO são aqueles que executam o acionamento das válvulas DCVs.

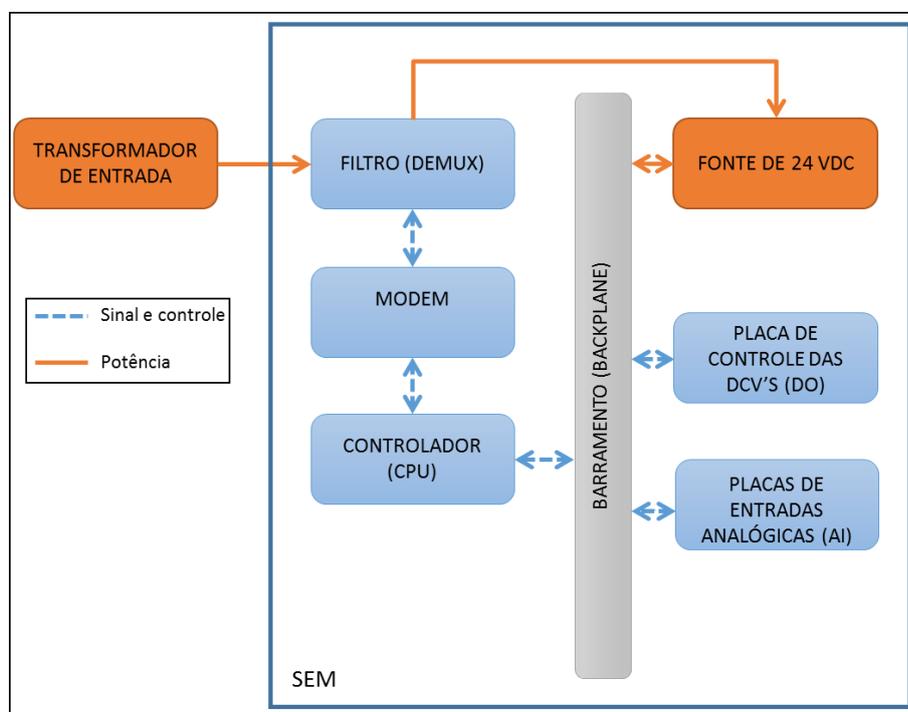


Figura 4.3 – Arquitetura funcional do SCM: componentes eletrônicos.

A Figura 4.4 ilustra a arquitetura básica dos componentes mecânicos presentes no SCM. O suprimento hidráulico vindo do UEH é conectado na estrutura do equipamento submarino (ANM ou Manifold) e interligado ao circuito hidráulico do equipamento por um HFL. A conexão hidráulica com o SCM é feita através de uma placa hidráulica presente na sua base denominada, usualmente, por *mouting base*.

A função de acionamento de válvulas, desempenhada pelo SCM, ainda pode ser subdividida em duas categorias: válvulas de baixa pressão ou LP (5.000 psi) e válvulas de alta pressão ou HP (10.000 psi). Normalmente, as válvulas de baixa pressão estão nos equipamentos, tais como ANM e *manifold*, enquanto que as válvulas atuadas por alta pressão são instaladas na coluna de produção, tal como, a válvula de segurança de sub-superfície (DHSV ou SSSV).

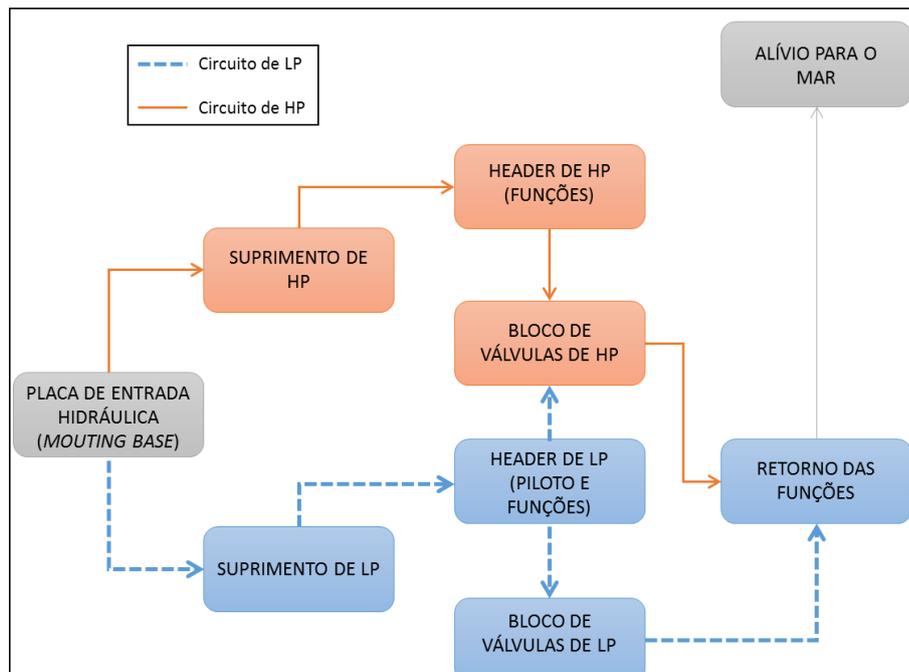


Figura 4.4 – Arquitetura funcional do SCM: componentes mecânicos.

Assim, no interior do SCM as linhas de HP e LP seguem caminhos distintos, conforme os blocos representados na Figura 4.4. Entretanto, o funcionamento das válvulas de HP também depende do suprimento de LP, porque as válvulas DCVs necessitam de uma linha piloto para fornecer potência hidráulica suficiente para que haja o deslocamento da válvula e, conseqüentemente, seja acionada a função requerida.

No projeto em questão, as ações de controle devem ser executadas para dezesseis funções hidráulicas de baixa pressão e quatro de alta. Além disso, cada saída hidráulica do SCM conta um sensor de pressão redundante que é interligado a cada uma SEM por fios distintos. Internamente, o SCM também possui quatro sensores de vazão para medir a quantidade de fluido utilizado no acionamento das funções que estão instalados nas linhas de suprimento e retorno de LP e HP. Essa variável é utilizada, em complemento ao valor de pressão, na realimentação do sistema como uma maneira de confirmação de que o comando foi executado conforme previsto.

4.2 Análise por Diagrama de Blocos

A predição da confiabilidade via DBC foi realizada fazendo-se a modelagem em partes. Primeiro foi modelada a confiabilidade dos componentes elétricos e eletrônicos e, na sequência, o modelo dos componentes mecânicos e hidráulicos. Essa separação foi realizada para facilitar o desenvolvimento e simplificação dos modelos. Sendo que, a confiabilidade do sistema é resultado da multiplicação das confiabilidades dos subsistemas elétricos e mecânicos-hidráulicos, de superfície e submarinos.

4.2.1 Confiabilidade dos componentes eletrônicos de superfície

Apesar da complexidade e quantidade de subcomponentes que integram a MCS e a EPU (CLPs, modems, filtros, *switches*, disjuntores, transformadores, dispositivos de proteção, transdutores, etc.), o estudo dos componentes de superfície a representação gráfica do modelo contará apenas com dois blocos, conforme ilustrado na Figura 4.5. Essa modelagem enxuta, quando comparada a quantidade de componentes, é possível porque a OREDA não faz distinção entre os diversos componentes de superfície no registro e na estimativa das taxas de falhas.

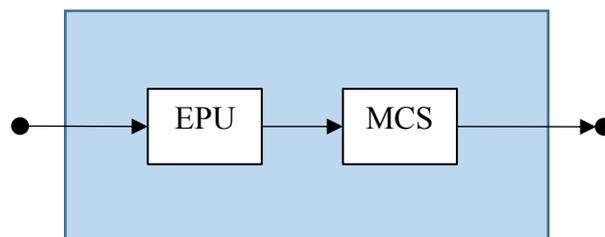


Figura 4.5 – DBC para os componentes de superfície.

Assim, como os dois equipamentos estão em série, a confiabilidade total dos componentes instalados na superfície é dada pelo produto da confiabilidade individual de cada um. Dessa forma, a equação da confiabilidade é dada por:

$$R_{sup}(t) = e^{-(\lambda_{MCS} + \lambda_{EPU}) \cdot t} \quad 4.1$$

A Tabela 4.1 resume os dados de taxa de falha de cada equipamentos utilizados nos cálculos, representados por λ (lambda). Em termos de taxa de falha, a taxa de falha total desse subsistema será a soma, totalizando, 141,58 falhas/10⁶h. Para se obter o tempo médio de falha ou um MTTF basta fazer o inverso da taxa de falha total que resulta em 7.063 horas, aproximadamente, conforme exposto na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Taxa de falhas dos equipamentos de superfície.

Componente	Taxa de falha por 10 ⁶ h	Quantidade	MTTF (horas)
1 EPU (λ_{EPU})	17,68	1	56.561
2 MCS (λ_{MCS})	123,90	1	8.071
Taxa de falha total (λ_{sup})	141,58	-	7.063

Fonte: (Oreda, 2015).

Conforme abordado na descrição do sistema, os equipamentos de superfície operam em pares redundantes. Logo, a confiabilidade será dada pelo produto da não confiabilidade de cada subsistema em paralelo.

$$R_{supr}(t) = 1 - (1 - R_{sup}(t))^2 \quad 4.2$$

Na Figura 4.6 é possível visualizar a confiabilidade para um conjunto EPU-MCS operando (linha tracejada - R_{sup}) e para os dois operando em redundância (linha contínua - R_{supr}). O eixo horizontal é o tempo em horas e o vertical a confiabilidade. Graficamente observa-se que apesar do sistema em série apresentar taxa de falha constante, sua associação em paralelo resulta numa confiabilidade que não segue a característica de taxa de falha constante. Isso pode ser confirmado visualmente pela característica do início da curva contínua na Figura 4.6. Ou seja, o resultado da associação em série e depois em paralelo de componentes com taxa constante não apresentará taxa de falha constante.

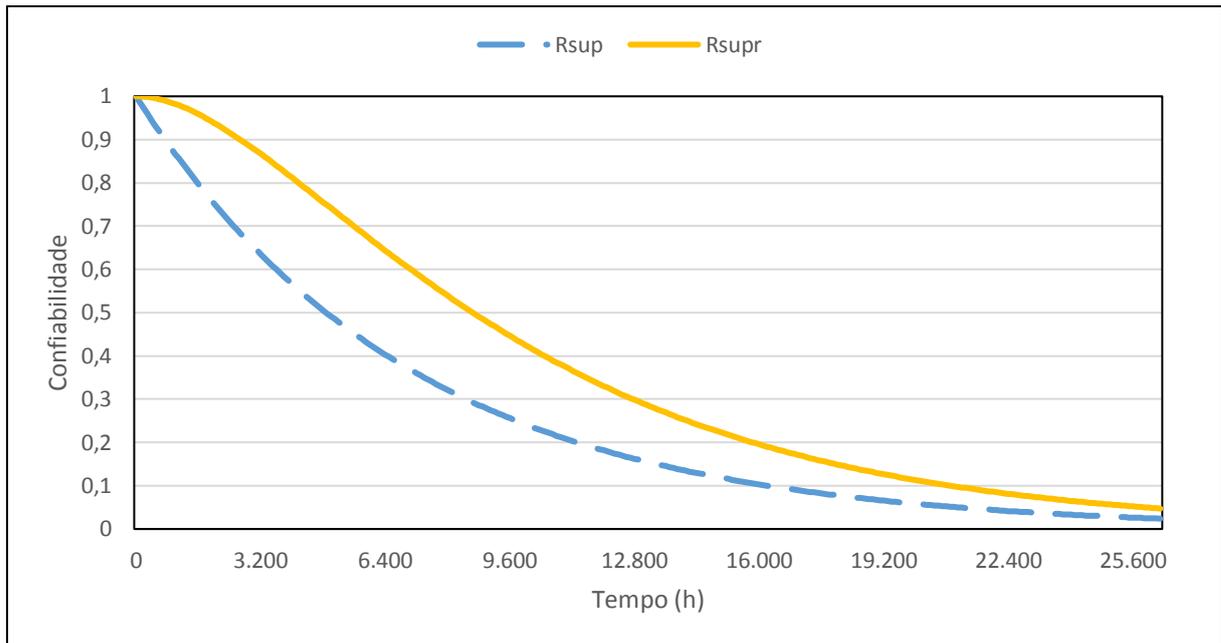


Figura 4.6 – Confiabilidade dos equipamentos de superfície.

A redundância traz um ganho significativo para a confiabilidade, principalmente no primeiro ano de operação do sistema. Enquanto que um conjunto MCS/EPU operando apresenta uma confiabilidade de 0,2866 passadas 8.800h (pouco mais de um ano), com a redundância o subsistema de superfície passa a ter confiabilidade de 0,4911. Isso significa que a probabilidade desse subsistema estar operacional no tempo $t = 8.800h$ é de 28,66% e 49,11%, sem e com redundância, respectivamente.

4.2.2 Confiabilidade dos componentes eletrônicos submarinos

Na Figura 4.7 é feita a modelagem dos equipamentos em relação à confiabilidade para o subsistema elétrico e de controle submarino. Nota-se que todos devem estar associados em série para o perfeito funcionamento, portanto a taxa de falha total do subsistema eletrônico submarino é calculada pela soma das taxas de falhas de cada componente e a equação da confiabilidade no tempo é:

$$R_{sube}(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8).t} \quad 4.3$$

Os números acima dos blocos PT e FT, na Figura 4.7, indicam a quantidade destes componentes presentes no interior do SCM. Os FTs integram as linhas de suprimento e retorno de HP e LP, totalizando quatro. Enquanto que os PTs estão presentes em cada linha de função

de válvula (16 funções de LP e 4 funções de HP), além das linhas de suprimento e retorno de HP e LP.

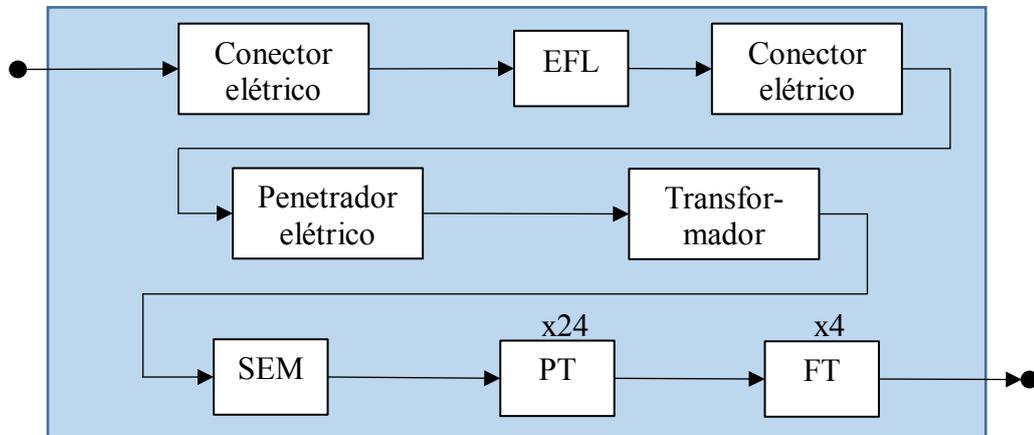


Figura 4.7 – DBC para os componentes eletrônicos submarinos.

A Tabela 4.2 resume os dados de taxa de falha (λ_n) de cada componente da Figura 4.7. Como todos os elementos foram modelados em série, a taxa de falha do subsistema é dada pela soma de cada taxa individual multiplicada pelo número de componentes de cada tipo. Isso resulta numa taxa de falha de constante de 42,17 falhas/10⁶h. Logo, o MTTF desse subsistema é de 23.713,54 horas, calculado como o inverso da taxa de falha total.

Tabela 4.2 – Taxas de falhas dos componentes elétricos e eletrônicos.

Componente	Taxa de falha por 10 ⁶ h	Quantidade	MTTF (horas)
1 Conector elétrico (λ_1)	0,42	1	2.380.952
2 EFL (λ_2)	0,24	1	4.166.667
3 Conector elétrico (λ_3)	0,13	1	7.692.308
4 Penetrador* (λ_4)	0,13	1	7.692.308
5 Transformador submarino (λ_5)	0,03	1	33.333.333
6 SEM (λ_6)	9,90	1	101.010
7 PT (λ_7)	0,72	24	1.388.889
8 FT (λ_8)	3,51	4	284.900
Taxa de falha total (λ_{sube})	42,17	-	23.713,54

Fonte: (Oreda, 2015).

*Foi considerada a taxa de falha idêntica ao componente 3.

Assim como os equipamentos de superfície, os componentes eletrônicos submarinos operam em dupla redundância do tipo *hot stand-by*. Logo, a confiabilidade final do sistema é

uma associação em paralelo de dois sistemas idênticos ao da Figura 4.7 que é representada matematicamente por:

$$R_{suber}(t) = 1 - (1 - R_{sube}(t))^2 \quad 4.4$$

Na Figura 4.8 está a confiabilidade dos componentes eletrônicos submarinos integrantes do SCS. A linha tracejada (R_{sube}) representa a confiabilidade de um sistema, enquanto que a linha contínua (R_{suber}) indica o sistema operando com a redundância. Nessa figura é possível constatar a influência da redundância contribuindo para uma maior probabilidade de disponibilidade no tempo de forma bastante significativa. Para o tempo $t = 8.800h$ a confiabilidade dos componentes elétricos e eletrônicos submarinos será de 0,6900 e 0,9039, sem e com redundância, respectivamente. Ou seja, nesse instante a redundância trouxe um ganho de aproximadamente 30% na confiabilidade desse subsistema.

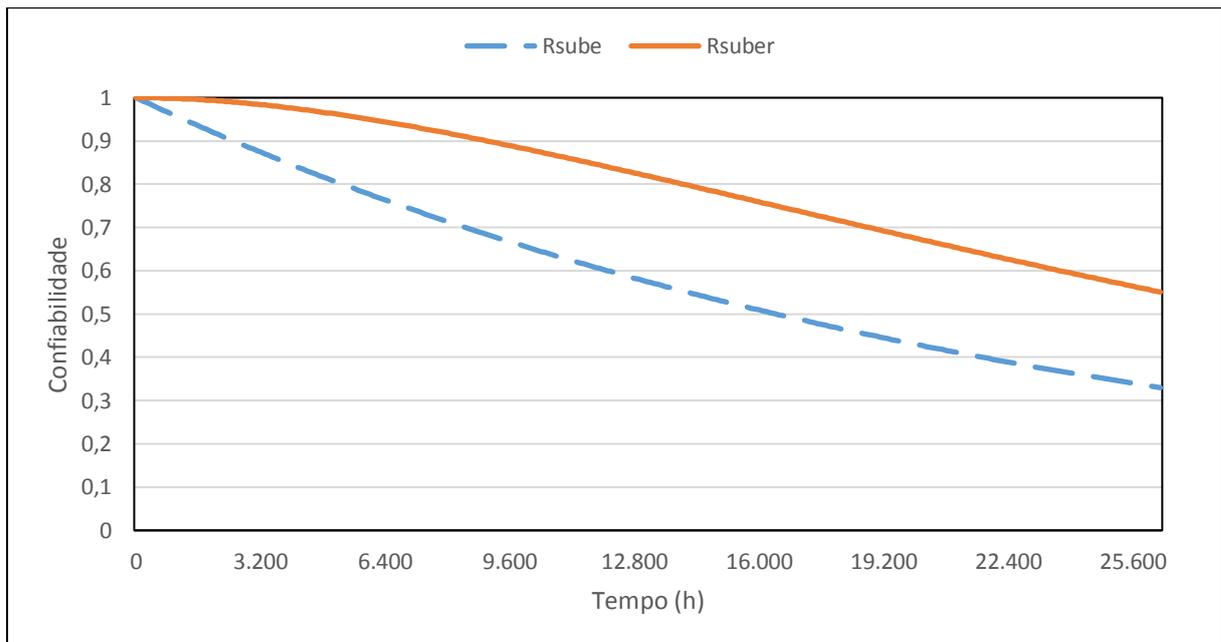


Figura 4.8 – Confiabilidade dos componentes eletrônicos submarinos.

A confiabilidade do subsistema eletrônico submarino, quando comparada com os componentes de superfície, apresenta valores bem superiores (90,39% contra 49,11%). No primeiro momento pode-se questionar a razão para que equipamentos submetidos a condições ambientais mais severas, como por exemplo a pressão externa, apresentem melhor confiabilidade. Uma das justificativas seria que a maior complexidade de *hardware* e *software* do SCS está nos equipamentos de superfície, justamente pela facilidade de executar inspeções

periódicas e manutenções com maior frequência e custos bastante reduzidos quando comparados com os equipamentos submarinos.

4.2.3 Confiabilidade dos componentes submarinos mecânicos e hidráulicos

Para o subsistema composto pelos componentes mecânicos e hidráulicos submarinos, a modelagem é um pouco mais complexa, como pode ser visualizado na Figura 4.9. Outra característica que difere dos subsistemas modelados até agora é a redundância, que não está presente para alguns componentes, seja por limitação física, técnica ou conceito do projeto.

Também é importante frisar que nesse modelo desenvolvido na Figura 4.9 foram representados apenas os componentes considerados críticos para o desempenho da função. Assim, para aqueles componentes que mesmo em falha seja possível desempenhar a função de controlar o equipamento submarino não estarão representados no diagrama de blocos.

Na Tabela 4.3 estão as taxas de falhas, representada por λ , de cada um dos componentes mecânicos. Porém, para esse subsistema o resultado da taxa de falha não será a soma das taxas individuais. A confiabilidade é calculada através da simplificação, por partes, das diversas associações em paralelo e em série.

Tabela 4.3 – Taxas de falhas dos componentes mecânicos e hidráulicos submarinos.

Componente	Taxa de falha por 10 ⁶ h	MTTF (horas)
1 Conector hidráulico (λ_a)	0,17	5.882.353
2 HFL (λ_b)	0,68	1.470.588
3 <i>Mounting base</i> (λ_c)	0,29	3448276
4 Filtro (λ_d)	0,02	50.000.000
5 Válvula <i>check</i> (λ_e)	0,53	1.886.792
6 DCV (λ_f)	0,53	1.886.792
7 Compensador/Acumulador (λ_g)	0,09	11.111.111

Fonte: (Oreda, 2015).

As equações matemáticas que correspondem aos blocos do modelo apresentado na Figura 4.9 foram inseridas no *Modellus*, bem como os valores das taxas de falha de cada componente. As equações que representam cada circuito hidráulico e a equação do modelo proposto para a confiabilidade dos componentes mecânicos podem ser verificadas no Apêndice A – Cálculo da Confiabilidade dos componentes submarinos mecânicos e hidráulicos.

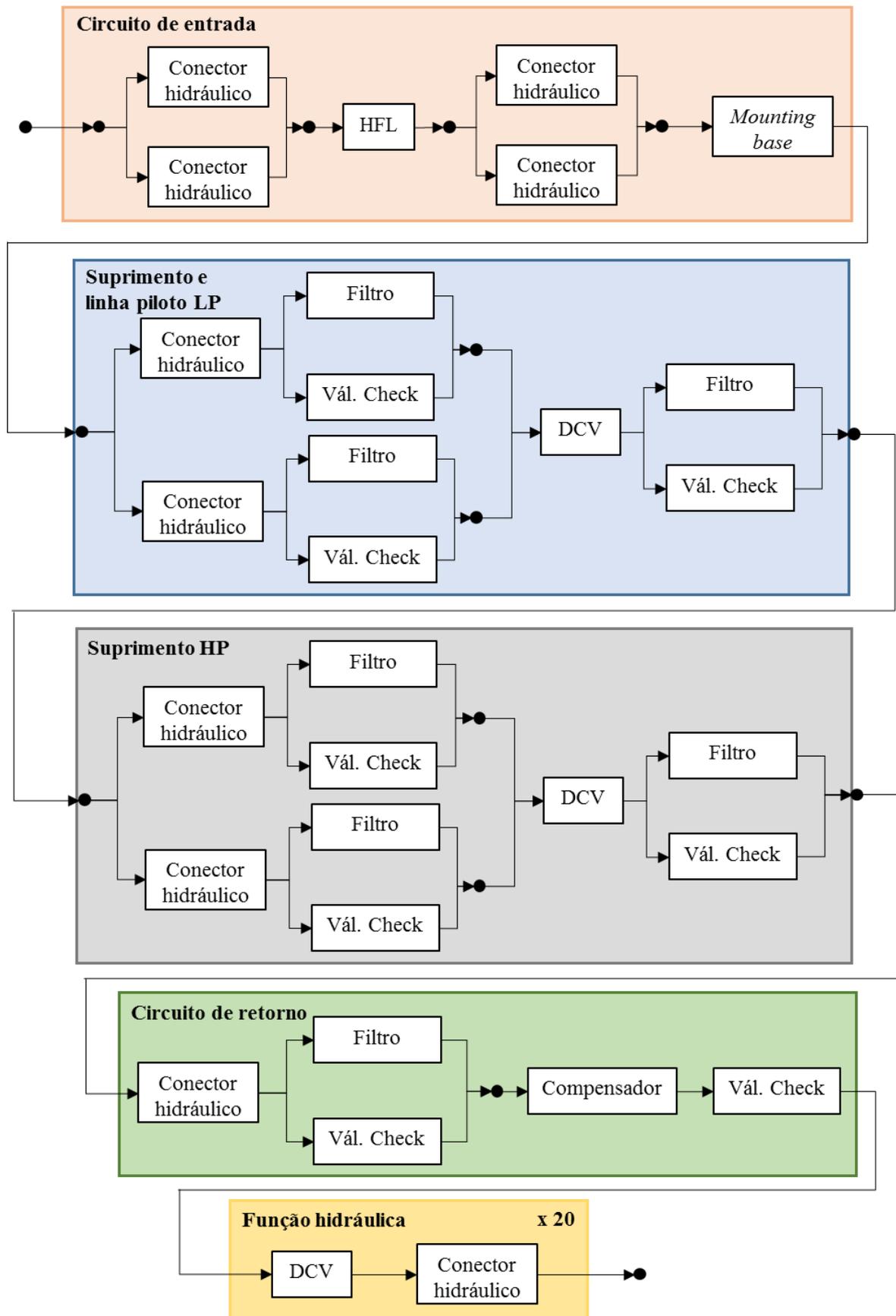


Figura 4.9 – DBC dos componentes mecânicos e hidráulicos submarinos.

O resultado para a confiabilidade da associação desses componentes está na Figura 4.10. A curva contínua, indicada no gráfico por demais blocos, representa a confiabilidade dos componentes que integram o circuito de entrada (R_{eh}), suprimento de LP (R_{slp}), suprimento de HP (R_{shp}) e circuito de retorno (R_r). A linha pontilhada é a confiabilidade do bloco de válvulas formado pelas vinte DCVs (R_{tf}) que executam o acionamento das válvulas dos equipamentos. A linha tracejada (R_{sh}) é a confiabilidade total dos componentes mecânicos e hidráulicos submarinos.

Essa distinção da representação gráfica da confiabilidade ilustrada na Figura 4.10 foi feita com o objetivo de identificar a contribuição relativa de cada bloco modelado na Figura 4.9. Ao final de uma missão de 8.800h de operação, a confiabilidade do subsistema formado pelos componentes mecânicos é de 0,8624. Na Figura 4.10, observa-se que a maior influência na confiabilidade desse subsistema são as vinte DCVs responsáveis pelas funções de atuação das válvulas dos equipamentos (curva pontilhada – R_{tf}).

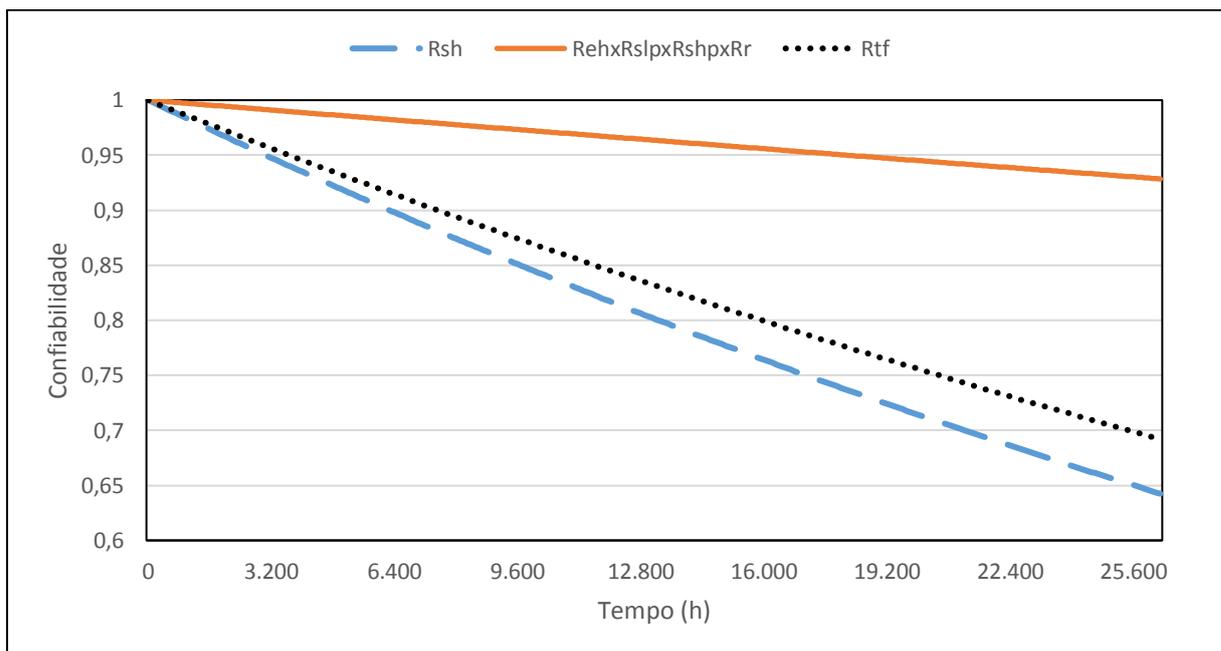


Figura 4.10 – Confiabilidade dos componentes mecânicos e hidráulicos submarinos.

Os demais componentes representados na Figura 4.9 apresentam uma confiabilidade bastante alta, quando comparada com os demais subsistemas de superfície e eletrônico submarino. Uma razão é que os componentes mecânicos apresentam redundância em baixo nível, ou seja, a redundância é feita a nível dos componentes. Isso é visualizado na Figura 4.9 através das associações em paralelo do filtro e válvula *check*, assim como a redundância das

linhas de suprimento de LP e HP. Realizar a redundância a nível mais baixo traz um ganho na confiabilidade muito maior do que a redundância de alto nível como feito para os equipamentos de superfície, por exemplo.

4.2.4 Confiabilidade do SCS MUX

A confiabilidade total do sistema de controle submarino para um poço é calculada pela associação em paralelo e série da confiabilidade de cada subsistema modelado anteriormente. A Figura 4.11 traz o modelo de confiabilidade do SCS MUX aqui estudado, onde os blocos R_{sup} , R_{sub-e} e R_{sub-h} representam as confiabilidades que foram calculadas nas seções 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3, respectivamente.

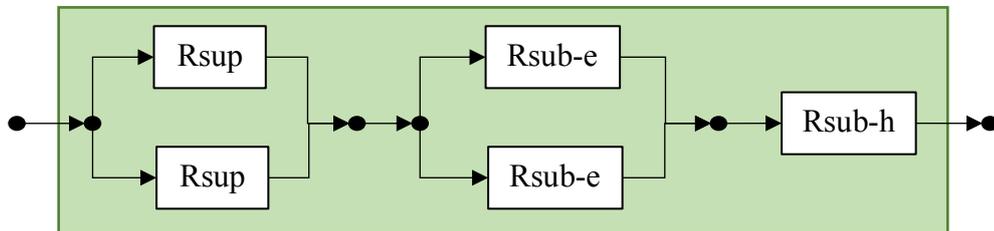


Figura 4.11 – DBC de todo o sistema de controle.

Com os resultados das confiabilidades individuais de cada subsistema, as equações desenvolvidas para cálculo da confiabilidade resultante do sistema, representado na Figura 4.11, foram inseridas no *Modellus*, juntamente com os dados de taxa de falha. Dessa maneira, foi possível obter a confiabilidade do modelo na forma do gráfico presente na Figura 4.12.

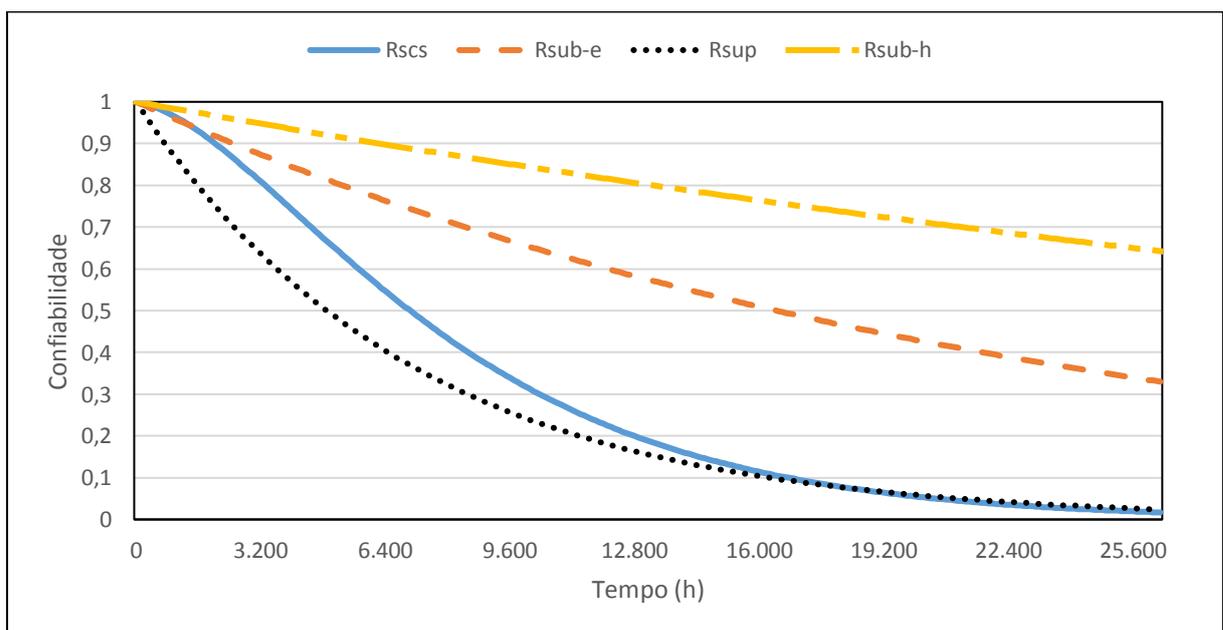


Figura 4.12 – Confiabilidade do SCS MUX.

A linha contínua (R_{scs}) indica a confiabilidade do SCS. É possível identificar que a confiabilidade é bastante influenciada pelos componentes de superfície (MCS e EPU), representada pela linha pontilhada (R_{sup}), inclusive no longo prazo, a confiabilidade do SCS (R_{scs}) tende à confiabilidade dos componentes de superfície (R_{sup}).

A confiabilidade do sistema para o controle com um SCM é 0,3840 quando $t = 8.800$ h. Ou seja, para o controle de um poço, passado esse período com o sistema em operação, a probabilidade do sistema de controle ainda estar completamente operacional, desempenhando todas as funções especificadas, é de 38,40%.

Para avaliar o impacto relativo de cada subsistema foram traçadas as curvas apresentadas na Figura 4.13, onde R_{sub-r} e R_{sup-r} representam, respectivamente, as confiabilidades para o subsistema submarino e de superfície já considerando os componentes redundantes, de acordo com o modelo da Figura 4.11.

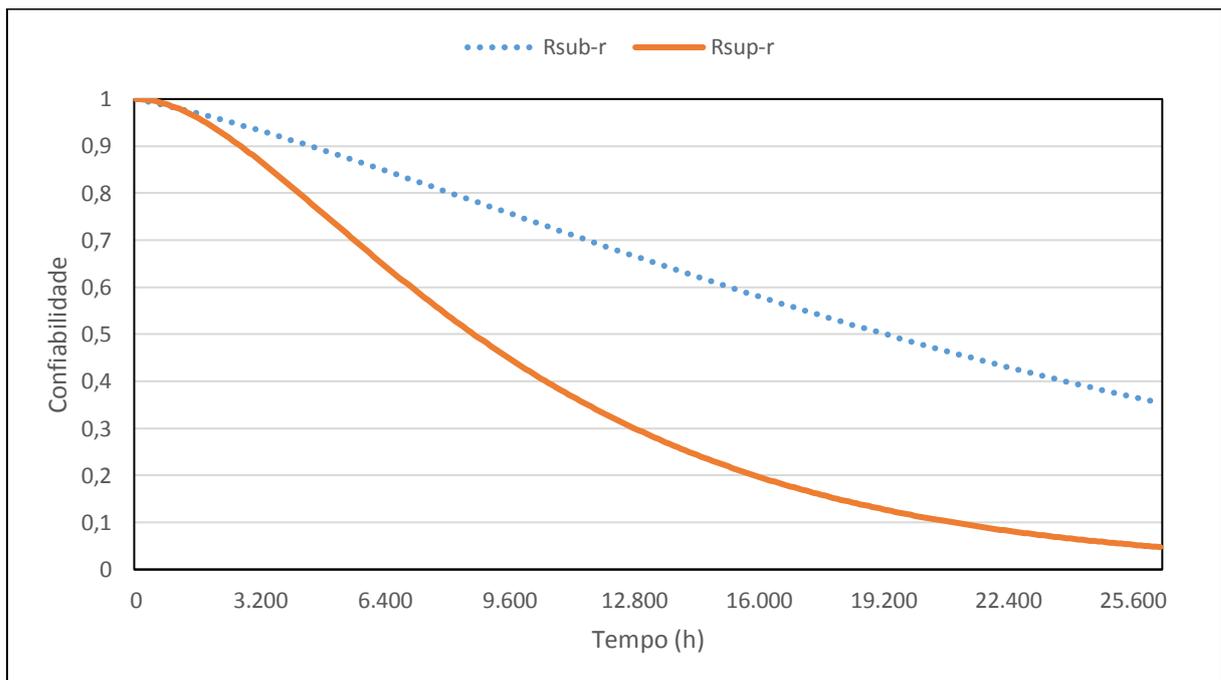


Figura 4.13 – Comparação entre o subsistema de superfície e submarino.

Como descrito anteriormente na seção 4.1, o SCS estudado tem a capacidade de controlar cinco poços. Portanto, a confiabilidade para cinco SCMs controlados a partir do mesmo par de equipamentos de superfície foi calculada para o período 8.800 horas e está representada na Figura 4.14. Após transcorrido esse tempo, as probabilidades para o sistema

estar completamente funcional, para os cenários de 2 a 5 poços operando, será de 29,93% (2 poços), 23,33% (3 poços), 18,19% (4 poços) e 14,18% (5 poços).

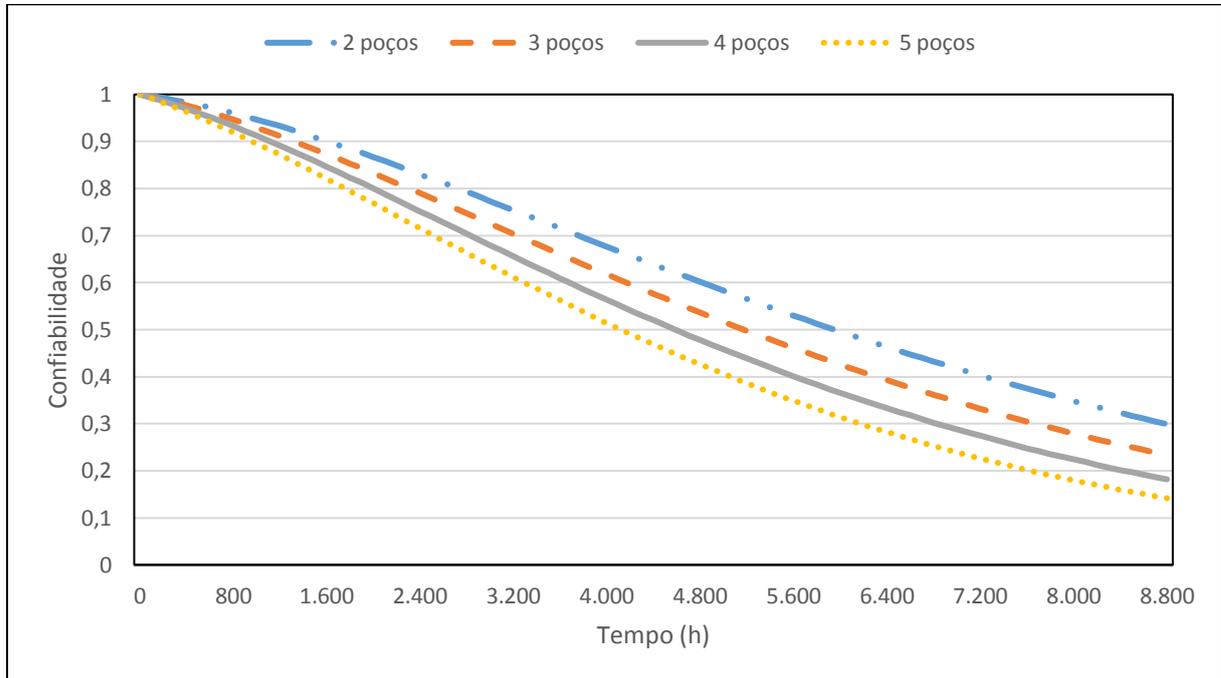


Figura 4.14 – Confiabilidade do SCS MUX para até 5 poços.

4.2.5 Medidas de importância dos subsistemas do SCS

Nos gráficos apresentados nas Figura 4.15 e Figura 4.16 estão as medidas de Birnbaum e importância crítica para o SCS representado na Figura 4.11. O índice de Birnbaum confirma a interpretação dada às curvas de confiabilidade até aqui avaliadas. Ou seja, o subsistema com a pior confiabilidade (R_{sup}) é considerado o mais importante, segundo essa medida, por ser o elo fraco do sistema. Em outras palavras, o sistema de superfície é considerado crítico durante maior parte do tempo porque seu estado definirá o estado de todo sistema.

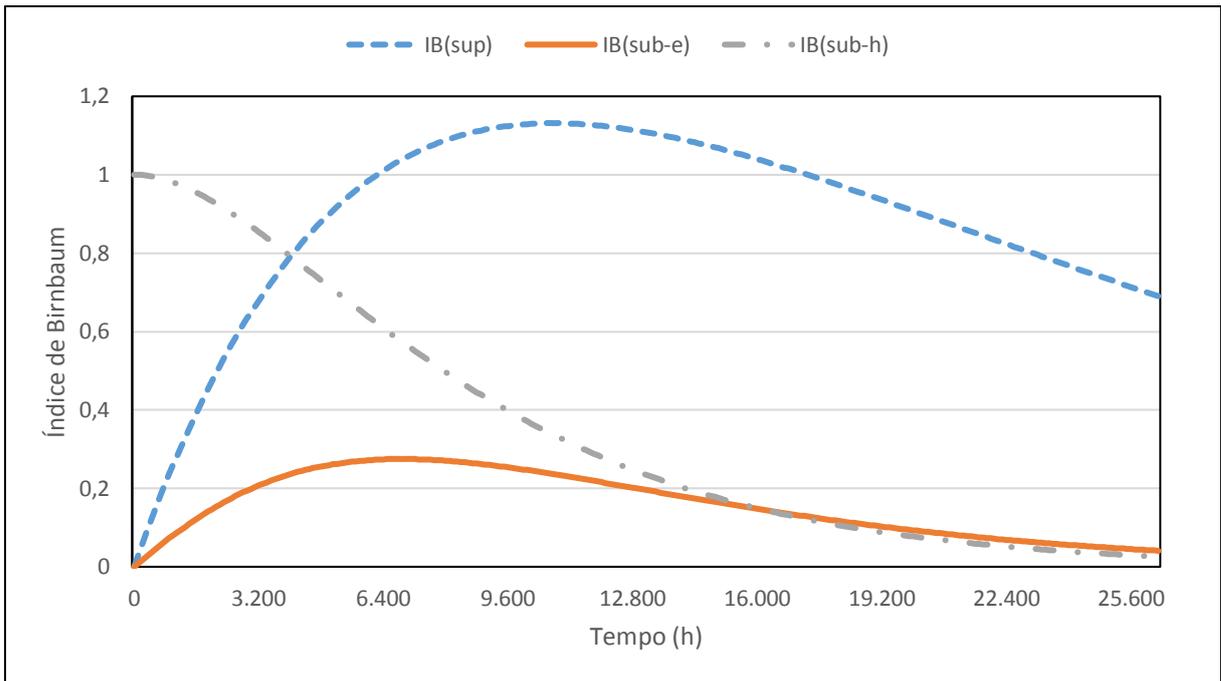


Figura 4.15 – Índice de Birnbaum para o SCS MUX.

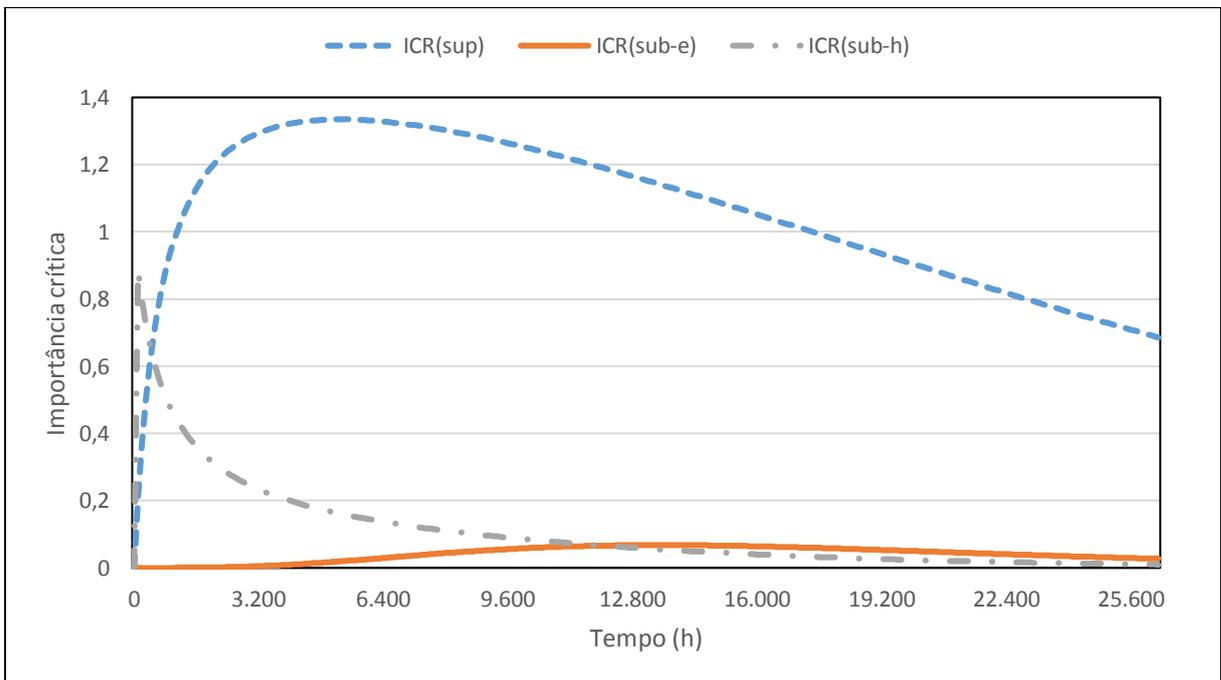


Figura 4.16 – Medida de importância crítica do SCS MUX.

Nas curvas do índice de importância (Figura 4.16), apesar de apresentar o mesmo resultado da medida de Birnbaum em termos de prioridade ($R_{sup} > R_{sub-e} = R_{sub-h}$), conceitualmente tem outro significado. Elas indicam que quando o sistema estiver inoperante deve-se priorizar os subsistemas com maiores índices na investigação para identificação falha e manutenção do sistema.

4.3 Análise por Árvore de Falha

Para a construção da árvore de falha foi considerado como insucesso do sistema (evento topo) a perda de controle do poço, uma vez que este é o objetivo fim do SCS e esse evento causaria restrições operacionais e de segurança do processo que podem levar à interrupção temporária da produção e, conseqüentemente, perda financeira ou algum incidente relacionado a segurança operacional da planta. Nesse ponto é importante frisar que esta análise não modelou todas as possíveis falhas do sistema, apenas as mais relevantes que contribuem diretamente para a ocorrência do evento topo definido.

Em seguida, a estruturação da árvore de falha foi dividida em subsistemas de acordo com a disciplina envolvida diretamente, conforme definido anteriormente e representado na Figura 1.4. Esse passo foi feito com intuito de facilitar o entendimento de todo o sistema, além de permitir identificar a contribuição de cada subsistema no cálculo da confiabilidade total. Essa abordagem pode ser visualizada graficamente na Figura 4.17, onde os oito subsistemas definidos estão ligadas ao evento topo por uma porta OU.

Cada um dos eventos definidos e interligados ao evento topo foram desenvolvidos até o nível do evento básico correspondente. As linhas de comando utilizadas no *software* R para realizar as análises e a construção da árvores estão Apêndice B – Árvore de falha no software R. A representação gráfica da árvore de falha pode ser encontrada no Apêndice E – Árvore de Falha do sistema de controle submarino. Já os dados de taxa de falha de cada evento básico estão listados no Apêndice C – Eventos básicos.

4.3.1 Análise Quantitativa

Para a análise quantitativa da árvore de falha são fundamentais os dados relativos à confiabilidade dos eventos básicos, tais como taxa de falha, tempo médio de falha, tempo de reparo, etc. Assim como nas análises anteriores, a modelagem realizada considerou a taxa de falha constante disponibilizada pelo banco de dados OREDA.

A representação gráfica da probabilidade de falha presente na Figura 4.17 foi gerada para o período de análise correspondendo a 26.508h. Nesta figura está indicada a probabilidade de falha do evento topo ao lado direito da porta lógica OU pelo número 1. Assim como, cada um dos eventos que contribuem para o evento que estão representados logo abaixo com a indicação de sua respectiva probabilidade de falha. As probabilidades resultantes permitem afirmar que o evento Falha de comunicação é o que tem a maior probabilidade de levar ao evento topo (38,19%), seguido da Falha eletrônica submarina (32,87%) e da Falha do acionamento das funções hidráulicas (16,49%).

O cálculo da probabilidade de falha foi feito para um período ligeiramente superior a três anos (26.508 h). A Figura 4.18 resume o resultado da análise nesse período, sendo que o eixo das abscissas está na unidade de horas em escala logarítmica para manter a melhor disposição visual da curva. Nela é possível identificar que as probabilidades de falha para o período de 7.400 h e 26.508 h são, respectivamente, 17,35% e 67,52%. Em outros termos, a confiabilidade nos pontos destacados são 82,65% e 32,48%.

Outro aspecto interessante observado na Figura 4.18 é que nas primeiras 1.100h, considerando que o sistema foi devidamente instalado, testado e comissionado, a probabilidade de falha ao final desse período é de 1,78%. A partir desse momento, a probabilidade de falha cresce mais rapidamente com taxas de variação cada vez maiores.

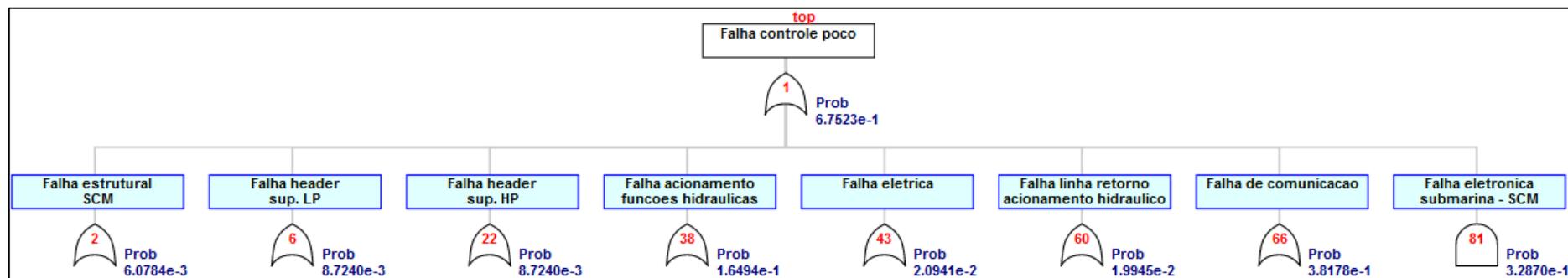


Figura 4.17 – Árvore de falha: Evento topo.

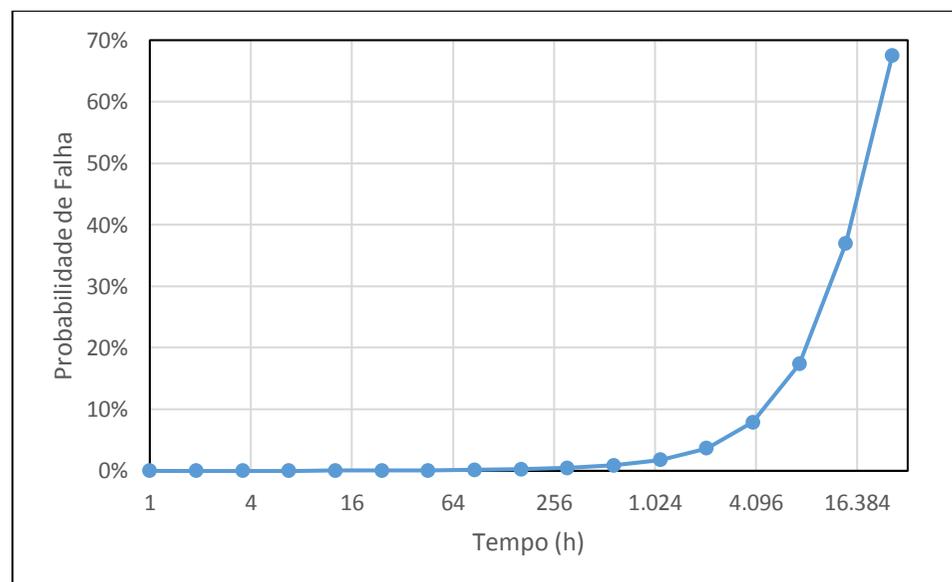


Figura 4.18 – Probabilidade de falha pela AAF.

4.3.2 Análise Qualitativa

A avaliação qualitativa da árvore de falha foi realizada através da identificação dos cortes mínimos (*cut sets*), que consiste em determinar os conjuntos mínimos de eventos básicos necessários para causar a ocorrência do evento topo. Ou seja, o *cut set* mínimo pode ser verificado fazendo-se uma simulação do cenário onde todos os componentes que o integram não estão operantes e os demais estão e o sistema permanece inoperante. Nessa condição, se um elemento do *cut set* volta a operar o sistema também retorna.

Na simulação feita no *software* R resultou em sessenta *cut sets* mínimos que estão listados no Apêndice D – *Minimal cut set* (cortes mínimos). Sendo treze de 1ª ordem, quarenta e um de 2ª ordem, quatro de 3ª ordem e dois de 4ª ordem. A ordem indica a quantidade de elementos (eventos básicos) que compõem o *cut set*. Não foram identificados conjuntos com ordem superior a quatro.

Os elementos mais críticos identificados a partir desse tipo de análise são os *cut sets* que apresentam a menor quantidade de elementos. Por exemplo, um *cut set* de um elemento significa que caso esse componente falhe todo o sistema ficará inoperante. Entretanto, dado a quantidade de conjuntos, eles foram ordenados em ordem decrescente em relação ao peso relativo das suas probabilidades de ocorrência. A Tabela 4.4 traz os quatorze *cut sets* que representam, proporcionalmente, 94,73% das probabilidades de falha de todos os conjuntos encontrados. Logo, os demais quarenta e seis conjuntos são responsáveis por 5,27%.

Tabela 4.4 – *Cut sets* com probabilidade mais altas.

<i>Cut sets</i>	Prob. de Falha	1 – PF	Peso relativo	Total
E20,E37	0,2776	0,7224	23,05%	23,05%
E19	0,1441	0,8559	11,97%	35,01%
E8	0,1054	0,8946	8,74%	43,76%
E27,E44	0,0768	0,9232	6,37%	50,13%
E26,E44	0,0755	0,9245	6,27%	56,40%
E27,E43	0,0755	0,9245	6,27%	62,67%
E26,E43	0,0742	0,9258	6,16%	68,83%
E25,E44	0,0521	0,9479	4,33%	73,16%
E27,E42	0,0521	0,9479	4,33%	77,49%
E10	0,0516	0,9484	4,29%	81,77%
E25,E43	0,0512	0,9488	4,25%	86,03%
E26,E42	0,0512	0,9488	4,25%	90,28%
E25,E42	0,0354	0,9646	2,94%	93,22%
E13,E36	0,0182	0,9818	1,51%	94,73%

Assim, os eventos básicos e as respectivas combinações listados na coluna *Cut sets* da Tabela 4.4 são as falhas mais prováveis de acontecer e indicam os pontos críticos do sistema de controle submarino quando se considera como evento topo a perda de controle do poço. A coluna peso relativo informa o quanto a probabilidade daquele *cut set* representa em relação a todo o conjunto encontrado na análise. A coluna total indica o somatório dos percentuais dos conjuntos mínimos.

O conjunto {E20, E37}, que tem o maior peso relativo, contém as falhas relacionadas ao sistema de controle de superfície das MCS A e MCS B, respectivamente. O evento E19, segunda linha na Tabela 5.4, ainda está relacionado ao sistema de superfície e modela o somatório das taxas de falhas de operação espúria, saída errônea do controlador e falhas desconhecidas. O evento E8 indica as falhas de vazamento hidráulico para o meio interno ou externo das DCVs que executam as vinte funções de controle do SCM. Já os seis conjuntos subsequentes estão ligados a eventos de falha nos componentes eletrônicos submarinos (E27 e E44 – falha nos sensores de vazão do SCM, E26 e E43 – falha dos sensores de pressão do SCM e E25 e E42 – falha das SEMs).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa pesquisa contribuiu na aplicação da engenharia de confiabilidade na indústria de equipamentos submarinos aplicados na produção de óleo e gás, mais especificamente em sistemas de controle submarinos de poços do pré-sal brasileiro. Um sistema de controle de poços submarinos foi descrito, em termos de sua funcionalidade, de modo a facilitar a compreensão do estudo. Também foram apresentados os principais equipamentos que compõe os sistemas submarinos de produção de petróleo.

O conceito de confiabilidade, normas, ferramentas de análise de confiabilidade e o banco de dados de falhas mantido pela OREDA para equipamentos utilizados no meio *offshore* foram apresentados. Com uso do diagrama de blocos de confiabilidade e dos dados de taxa de falha da OREDA, foi realizado o cálculo da predição da confiabilidade de um sistema de controle eletro-hidráulico de poços submarinos de produção de petróleo.

O *handbook* OREDA apresenta uma vasta quantidade de dados, não restrita aos componentes do sistema de controle submarino, que podem ser bastante úteis para análises de confiabilidade quando realizadas, preferencialmente, ainda na fase de projeto dos sistemas. Além disso, dada a quantidade de equipamentos e o tempo de operação acumulada dos mesmos endossam a relevância desse banco de dados.

O uso do *Modellus* para calcular a confiabilidade via DBC se mostrou bastante útil, por permitir realizar a modelagem através da notação matemática usual e possibilitar a geração de gráficos. Essas características trouxeram agilidade na etapa de modelagem do sistema e na extração e interpretação dos resultados obtidos.

Dada a grande influência da MCS na confiabilidade do sistema, seria interessante realizar o registro de falhas dos subcomponentes, tais como, controladores, *switches*, filtros, etc. Mesmo que os diversos fornecedores tenham configurações e topologias distintas, essa estratificação poderá facilitar a identificação dos gargalhos no nível de componente. Isso forneceria insumos para se projetar sistemas redundantes de baixo nível, cujo reflexo na confiabilidade final é maior do que redundância de alto nível. Essa é uma limitação desse estudo imposta pelo OREDA que não faz essa estratificação para o subsistema de superfície.

Através da modelagem do SCS por DBC foi possível identificar os subsistemas críticos do sistema. Os equipamentos de superfície, mais precisamente o MCS, é o componente com maior impacto na confiabilidade do sistema, seguido dos componentes mecânicos/hidráulicos

submarinos e eletrônicos submarinos, nessa ordem. Para contornar possíveis falhas os equipamentos e componentes já contam com redundância em *hot stand-by*, o que eleva consideravelmente a confiabilidade do sistema.

Na região submersa, o SCM é o principal equipamento e foi possível modelá-lo no nível dos componentes. Nesse caso, identificou-se que o subsistema formado pelos elementos mecânicos apresenta boa confiabilidade e sua redundância é realizada em baixo nível, ou seja, no nível do componente. Sendo bastante influenciada pelo bloco de válvulas DCVs que executam as funções. Isso acontece porque essas válvulas não possuem redundância.

Os componentes eletrônicos submarinos são os que apresentaram maiores valores de confiabilidade. Isso foi obtido através da redundância completa de todos os componentes, inclusive o cabeamento interno do SCM. Outra característica que influencia nesse resultado é a menor complexidade desse subsistema quando comparado aos equipamentos de superfície.

A predição da confiabilidade calculada para que o sistema de controle estudado opere durante um ano cinco poços simultaneamente sem apresentar falha é de 14,18 %, isto já levando em consideração as redundâncias existentes nos equipamentos. Para um sistema controlando apenas um poço a probabilidade é de 38,40% ao fim do mesmo período.

O *software* R é uma ferramenta que permite a construção e análise quantitativa e qualitativa de árvore de falha. A forma de construção através de linhas de comando, apesar de não ser usual quando comparado à *softwares* comerciais, não gerou nenhuma dificuldade relacionada a essa característica. Além disso, por ser um projeto aberto e livre há diversos exemplos disponíveis que facilitam o uso da ferramenta.

O estudo de confiabilidade por árvore de falha encontrou uma probabilidade de 32,48% do sistema estar operacional passadas 26.500h. Essa probabilidade é maior em relação à análise por DBC, porque nessa avaliação são consideradas apenas as falhas que agem diretamente para a ocorrência do evento topo (falha no controle do poço). Ao contrário da análise por DBC que considera qualquer falha como crítica. Além disso, a hierarquização em termo de falhas resulta numa estrutura diferente da que foi feita por blocos de confiabilidade.

As falhas que tem maior influência na probabilidade da ocorrência do evento topo são Falha de comunicação (38,19%), seguido da Falha eletrônica submarina (32,87%) e da Falha do acionamento das funções hidráulicas (16,49%). Sendo estas probabilidades calculadas para o tempo de missão de 26.500h.

Na análise qualitativa da árvore de falha foram encontrados sessenta *cut sets*. Destes conjuntos, quatorze deles são responsáveis por 94,73% das probabilidades de todos os conjuntos encontrados. Os eventos básicos presentes nos conjuntos mais representativos estão relacionados a falha do sistema de controle de superfície MCS A e MCS B, falhas de operação espúria, saída errônea do controlador e falhas desconhecidas no sistema de superfície, falhas de vazamento hidráulico para o meio interno ou externo das DCVs que executam as vinte funções de controle do SCM e falha nos componentes eletrônicos submarinos (falha nos sensores de vazão do SCM, falha dos sensores de pressão do SCM e falha das SEMs).

5.1 Trabalhos Futuros

Como continuidade deste trabalho, sugere-se o desenvolvimento de um sistema integrado de gestão voltado para o registro de falhas, análise de confiabilidade e integridade dos sistemas de controle submarinos. Esse sistema utilizaria a metodologia e modelos aqui desenvolvidos, fazendo a integração com os dados de falha de campo, consolidando os dados e as análises. Nesse ponto, poderiam ser definidos indicadores do processo ou do sistema e representa-los em um *dashboard* facilitando a visualização global dos sistemas de controle da companhia.

Outro caminho seria estudar outras topologias do sistema de modo a contornar ou minimizar a influência dos componentes e falhas críticas identificadas neste trabalho. Outra sugestão seria propor novas tecnologias em substituição ao conceito atualmente utilizado, por exemplo, sistemas de controle submarinos totalmente elétricos, controladores de superfície mais robustos, entre outras, e avaliar a confiabilidade do sistema nessas configurações.

Na área de sistemas submarinos poderiam ser realizados estudos e modelos que visem a predição da confiabilidade de componentes em tempo real. Ou seja, baseado em dados operacionais, tais como pressões de processo, temperatura e vazões e dados de monitoração dos equipamentos (tensões, correntes, etc.), um sistema especialista executaria rotinas baseadas em modelos físicos dos componentes e geraria relatórios com a previsão do comportamento do sistema e seus componentes, podendo inclusive acompanhar e prever a sua degradação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. (1994, November 30). NBR 5462 - Confiabilidade e manutenibilidade.
- ANP. (2017). *Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural* (No. 75) (p. 27). Brasil: Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
- Bai, Y., & Bai, Q. (2010). *Subsea engineering handbook*. Burlington, MA: Gulf Professional Pub.
- Benard, V., Cauffriez, L., & Renaux, D. (2008). The Safe-SADT method for aiding designers to choose and improve dependable architectures for complex automated systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(2), 179–196. <https://doi.org/10.1016/j.res.2006.12.020>
- Bitanov, A. (2015). *Reliability study of Subsea Control Module with focus on statistical methods*. NTNU, Trondheim. Retrieved from <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2351211>
- Cai, B., Liu, Y., Fan, Q., Zhang, Y., Yu, S., Liu, Z., & Dong, X. (2013). Performance evaluation of subsea BOP control systems using dynamic Bayesian networks with imperfect repair and preventive maintenance. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(10), 2661–2672. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2013.08.011>
- Cai, B., Liu, Y., Liu, Z., Tian, X., Dong, X., & Yu, S. (2012). Using Bayesian networks in reliability evaluation for subsea blowout preventer control system. *Reliability Engineering & System Safety*, 108, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.res.2012.07.006>

- Cai, B., Liu, Y., Liu, Z., Tian, X., Li, H., & Ren, C. (2012). Reliability analysis of subsea blowout preventer control systems subjected to multiple error shocks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(6), 1044–1054. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.07.014>
- Calixto, E. (2013). Reliability, Availability, and Maintainability Analysis. In *Gas and Oil Reliability Engineering* (pp. 169–347). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391914-4.00004-6>
- Čepin, M. (2011). Fault Tree Analysis. In M. Čepin, *Assessment of Power System Reliability* (pp. 61–87). London: Springer London. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-688-7_5
- Dash, I. (2012). *Provision of Reliability Data for New Technology Equipment in Subsea Production Systems*. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim. Retrieved from <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:629238>
- Drægebø, E. (2014). *Reliability Analysis of Blowout Preventer Systems*. NTNU, Trondheim.
- EIA. (2016). *International Energy Outlook 2016*. Washington, DC: U.S. Energy Information Administration.
- Fogliatto, F. S., & Ribeiro, J. L. D. (2009). *Confiabilidade e manutenção industrial*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/book/9788535233537>
- Gil, A. C. (2009). *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas.

- Hauge, S., Håbrekke, S., & Lundteigen, M. A. (2010). *Reliability Prediction Method for Safety Instrumented Systems – PDS Example collection*. Norway: SINTEF Technology and Society Safety Research.
- IEC 61025. (2006). IEC 61025 - Fault tree analysis (FTA).
- IEC 61078. (2016). IEC 61078 - Reliability block diagrams.
- ISO 13628-4. (2010). Petroleum and natural gas industries - Design and operation of subsea production systems - Part 4: Subsea wellhead and tree equipment.
- ISO 13628-6. (2006). Petroleum and natural gas industries -- Design and operation of subsea production systems -- Part 6: Subsea production control systems. Retrieved from http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=35530
- Jordán, P. R. (2016). *Processos de Confiabilidade na Indústria de Óleo e Gás* (Edição: 1ª). Interciência.
- Khan, F. (2001). Equipment reliability: a life-cycle approach. *Engineering Management Journal*, 11(3), 127. <https://doi.org/10.1049/em:20010309>
- Kim, S., Chung, S., & Yang, Y. (2014). Availability analysis of subsea blowout preventer using Markov model considering demand rate. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(4), 775–787. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0211>
- Kiran, D. R. (2017). Reliability Engineering. In *Total Quality Management* (pp. 391–404). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811035-5.00027-1>
- Lafraia, J. R. B. (2001). *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade* (Economia edition). Qualitymark.

- Lin, J., Yuan, Y., & Zhang, M. (2014). Improved FTA Methodology and Application to Subsea Pipeline Reliability Design. *PLoS ONE*, 9(3), e93042. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093042>
- Liu, Z., Liu, Y., Cai, B., Zhang, D., & Zheng, C. (2015). Dynamic Bayesian network modeling of reliability of subsea blowout preventer stack in presence of common cause failures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 38, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.09.001>
- Mendes, A. P. do A., Romeiro, R. A. P., & Costa, R. C. da. (2012). Mercado e aspectos técnicos dos sistemas submarinos de produção de petróleo e gás natural. *BNDES Setorial*, n. 35, Mar. 2012, p. 155–188. Retrieved from <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1526>
- Okaro, I. A., & Tao, L. (2016). Reliability analysis and optimisation of subsea compression system facing operational covariate stresses. *Reliability Engineering & System Safety*, 156, 159–174. <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.07.018>
- Oreda (Ed.). (2015). *Offshore and onshore reliability data handbook. Volume 2: Subsea equipment* (6th edition). Norway: OREDA Participants.
- Petrobras. (2015). Conheça curiosidades sobre equipamentos de nossos sistemas submarinos. Retrieved July 26, 2017, from <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-curiosidades-sobre-equipamentos-de-nossos-sistemas-submarinos.htm>
- Petrobras. (2016, September 20). Plano Estratégico e Plano de Negócios e Gestão 2017-2021.

- R Core Team. (2017). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <https://www.R-project.org/>
- Rausand, M., & Høyland, A. (2004). *System reliability theory: models, statistical methods, and applications* (2nd ed). Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- Ren, H., Chen, X., & Chen, Y. (2017). Aircraft Reliability and Maintainability Analysis and Design. In *Reliability Based Aircraft Maintenance Optimization and Applications* (pp. 37–78). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812668-4.00003-4>
- Sætre, Ø. (2015). *Reliability assessment of subsea BOP control systems*. NTNU, Trondheim. Retrieved from <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2351242>
- Silkworth, D. J. (2017). FaultTree: Fault Trees for Risk and Reliability Analysis (Version R package version 0.2.8/r71). Retrieved from <https://www.R-project.org/projects/ftree/>
- Smith, D. J. (2001). *Reliability, maintainability, and risk: practical methods for engineers* (6th ed). Boston: Butterworth-Heinemann.
- Torell, W., & Avelar, V. (2004). Tempo Médio entre Falhas: Explicação e Padrões. W. Kingston, Rhode Island: American Power Conversion. Retrieved from http://xa.yimg.com/kq/groups/16643321/1021633048/name/wp_apc_mtb.pdf
- Vedachalam, N., Muthukrishna Babu, S., Ramadass, G. A., & Atmanand, M. A. (2014). Review of maturing multi-megawatt power electronic converter technologies and reliability modeling in the light of subsea applications. *Applied Ocean Research*, 46, 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2014.01.004>

Xing, L., & Amari, S. V. (2008). Fault tree analysis. In *Handbook of performability engineering* (pp. 595–620). Springer. Retrieved from http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84800-131-2_38

APÊNDICE A – CÁLCULO DA CONFIABILIDADE DOS COMPONENTES SUBMARINOS MECÂNICOS E HIDRÁULICOS

Confiabilidade do Circuito de Entrada Hidráulica ($R_{eh}(t)$) é:

$$R_{eh}(t) = e^{-(\lambda_b + \lambda_c).t} \cdot \left(1 - (1 - e^{-\lambda_a.t})^2\right) \cdot \left(1 - (1 - e^{-\lambda_a.t})^2\right) \quad (\text{A.I})$$

Confiabilidade da associação de um filtro e uma válvula de retenção (*check valve*) em paralelo ($R_{fc}(t)$):

$$R_{fc}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_d.t}) \cdot (1 - e^{-\lambda_e.t}) \quad (\text{A.II})$$

Confiabilidade do paralelo entre blocos idênticos, sendo estes uma associação em paralelo de um filtro e uma válvula de retenção ($R_{fc}(t)$) em série com um conector hidráulico ($R_{co}(t)$):

$$R_{co}(t) = e^{-\lambda_a.t} \quad (\text{A.III})$$

$$R_{co/fc}(t) = 1 - \left(1 - R_{co}(t) \cdot R_{fc}(t)\right)^2 \quad (\text{A.IV})$$

Assim, a confiabilidade dos componentes que formam o suprimento e header de baixa pressão é dada pelo produto entre (A.IV), (A.II) e a confiabilidade de uma válvula direcional (DCV):

$$R_{SLP}(t) = R_{co/fc}(t) \cdot e^{-\lambda_f.t} \cdot R_{fc}(t) \quad (\text{A.V})$$

Confiabilidade do circuito de retorno é:

$$R_r(t) = \left(e^{-(\lambda_a + \lambda_e + \lambda_g).t}\right) \cdot R_{fc}(t) \quad (\text{A.VI})$$

Confiabilidade do conjunto de DCVs que acionam as válvulas no equipamento submarino:

$$R_{tf}(t) = e^{-20 \cdot (\lambda_a + \lambda_f).t} \quad (\text{A.VII})$$

A confiabilidade dos componentes mecânicos e hidráulicos submarinos é representada por (A.VIII), sendo que $R_{SLP}(t) = R_{SHP}(t)$, pois apresentam os mesmos componentes e a mesma relação entre eles.

$$R_{Sh}(t) = R_{eh}(t) \cdot R_{SLP}(t) \cdot R_{SHP}(t) \cdot R_r(t) \cdot R_{tf}(t) \quad (\text{A.VIII})$$

APÊNDICE B – ÁRVORE DE FALHA NO SOFTWARE R

A seguir estão as linhas de comando desenvolvidas no R para a construção e análise da árvore de falhas para o SCS considerando como evento topo a Falha no Controle do Poço:

```
#carregar a biblioteca de árvore de falhas
```

```
library(FaultTree)
```

```
#Função para rodar a análise no tempo de estudo definido de  $1.89^{16}$ , que equivale a aproximadamente 26.600 horas
```

```
TimeStudy<-data.frame(Exposure_Time=NULL, Prob_of_Failure=NULL)
```

```
for(power in 0:16) {
```

```
tempo_expo<-1.89^power
```

```
# Início da árvore de falha
```

```
scs<-ftree.make(type="or", name="Falha controle poco")
```

```
scs<-addLogic(scs, at=1, type="or", name="Falha estrutural", name2="SCM")
```

```
scs<-addExposed(scs, at=2, mttf=1/0.9e-7, exposure=tempo_expo, tag="E1", name="Falha estrutural", name2="mounting base")
```

```
scs<-addExposed(scs, at=2, mttf=1/0.9e-7, exposure=tempo_expo, tag="E2", name="Falha compensacao", name2="fluido dieletrico")
```

```
scs<-addExposed(scs, at=2, mttf=1/0.5e-7, exposure=tempo_expo, tag="E3", name="Falha vedacao", name2="outercan")
```

```
scs<-addLogic(scs, at=1, type="or", name="Falha header", name2="sup. LP")
```

```
scs<-addExposed(scs, at=6, mttf=1/0.33e-6, exposure=tempo_expo, tag="E4", name="Falha DCV", name2="LP")
```

```
scs<-addLogic(scs, at=6, type="and", name="Falha do filtro", name2="de entrada LP")
```

```
scs<-addExposed(scs, at=8, mttf=1/0.02e-6, exposure=tempo_expo, tag="E5", name="Filtro entupido", name2="LP")
```

```
scs<-addExposed(scs, at=8, mttf=1/0.53e-6, exposure=tempo_expo, tag="E6", name="Check travada", name2="ou vazando")
```

```
scs<-addLogic(scs, at=6, type="and", name="Falha alimentacao", name2="redundante")
```

```
scs<-addLogic(scs, at=11, type="or", name="Linha LP A")
```

```
scs<-addExposed(scs, at=12, mttf=1/0.1e-6, exposure=tempo_expo, tag="E7", name="vazamento conector", name2="hidraulico LP A")
```

```
scs<-addLogic(scs, at=12, type="and", name="Falha do filtro", name2="suprimento LP A")
```

```
scs<-addExposed(scs, at=14, mttf=1/0.02e-6, exposure=tempo_expo, tag="E28", name="Filtro entupido", name2="suprim. LP A")
```

```
scs<-addExposed(scs, at=14, mttf=1/0.53e-6, exposure=tempo_expo, tag="E29", name="Check travada", name2="ou vazando")
```

```
scs<-addLogic(scs, at=11, type="or", name="Linha LP B")
```

```
scs<-addExposed(scs, at=17, mttf=1/0.1e-6, exposure=tempo_expo, tag="E50", name="vazamento conector", name2="hidraulico LP B")
```

```

scs<-addLogic(scs, at=17, type="and", name="Falha do filtro", name2="suprimento LP
B")
scs<-addExposed(scs, at=19, mttf=1/0.02e-6, exposure=tempo_expo, tag="E51",
name="Filtro entupido", name2="suprim. LP B")
scs<-addExposed(scs, at=19, mttf=1/0.53e-6, exposure=tempo_expo, tag="E52",
name="Check travada", name2="ou vazando")
scs<-addLogic(scs, at=1, type="or", name="Falha header", name2="sup. HP")
scs<-addExposed(scs, at=22, mttf=1/0.33e-6, exposure=tempo_expo, tag="E30",
name="Falha DCV", name2="HP")
scs<-addLogic(scs, at=22, type="and", name="Falha do filtro", name2="de entrada HP")
scs<-addExposed(scs, at=24, mttf=1/0.02e-6, exposure=tempo_expo, tag="E31",
name="Filtro entupido", name2="HP")
scs<-addExposed(scs, at=24, mttf=1/0.53e-6, exposure=tempo_expo, tag="E32",
name="Check travada", name2="ou vazando")
scs<-addLogic(scs, at=22, type="and", name="Falha alimentacao",
name2="redundante")
scs<-addLogic(scs, at=27, type="or", name="Linha HP A")
scs<-addLogic(scs, at=27, type="or", name="Linha HP B")
scs<-addExposed(scs, at=28, mttf=1/0.1e-6, exposure=tempo_expo, tag="E33",
name="vazamento conector", name2="hidraulico HP A")
scs<-addLogic(scs, at=28, type="and", name="Falha do filtro", name2="suprimento HP
A")
scs<-addExposed(scs, at=31, mttf=1/0.02e-6, exposure=tempo_expo, tag="E34",
name="Filtro entupido", name2="suprim. HP A")
scs<-addExposed(scs, at=31, mttf=1/0.53e-6, exposure=tempo_expo, tag="E35",
name="Check travada", name2="ou vazando")
scs<-addExposed(scs, at=29, mttf=1/0.1e-6, exposure=tempo_expo, tag="E53",
name="vazamento conector", name2="hidraulico HP B")
scs<-addLogic(scs, at=29, type="and", name="Falha do filtro", name2="suprimento HP
B")
scs<-addExposed(scs, at=35, mttf=1/0.02e-6, exposure=tempo_expo, tag="E54",
name="Filtro entupido", name2="suprim. HP B")
scs<-addExposed(scs, at=35, mttf=1/0.53e-6, exposure=tempo_expo, tag="E55",
name="Check travada", name2="ou vazando")
scs<-addLogic(scs, at=1, type="or", name="Falha acionamento", name2="funcoes
hidraulicas")
scs<-addLogic(scs, at=38, type="or", name="Falha DCV", name2="atuacao hidraulica")
scs<-addExposed(scs, at=39, mttf=1/4.2e-6, exposure=tempo_expo, tag="E8",
name="vazamento interno", name2="ou externo DCV")
scs<-addExposed(scs, at=39, mttf=1/0.6e-6, exposure=tempo_expo, tag="E9",
name="DCV bloqueada", name2="ou presa")
scs<-addExposed(scs, at=38, mttf=1/2e-6, exposure=tempo_expo, tag="E10",
name="vazamento conectores", name2="hidraulica da funcao")
scs<-addLogic(scs, at=1, type="or", name="Falha eletrica")
scs<-addLogic(scs, at=43, type="and", name="Falha atuacao", name2="submarina")
scs<-addExposed(scs, at=44, mttf=1/2e-6, exposure=tempo_expo, tag="E11",
name="falha atuacao DCV", name2="solenoide A")
scs<-addExposed(scs, at=44, mttf=1/2e-6, exposure=tempo_expo, tag="E12",
name="falha atuacao DCV", name2="solenoide B")

```

```

scs<-addLogic(scs, at=43, type="or", name="Potencia suprimimento",
name2="insuficiente")
scs<-addLogic(scs, at=47, type="and", name="Falha das EPU's", name2="A e B")
scs<-addExposed(scs, at=48, mttf=1/5.47e-6, exposure=tempo_expo, tag="E13",
name="falha EPU A")
scs<-addExposed(scs, at=48, mttf=1/5.47e-6, exposure=tempo_expo, tag="E36",
name="falha EPU B")
scs<-addLogic(scs, at=47, type="and", name="Perda do meio", name2="fisico")
scs<-addLogic(scs, at=51, type="or", name="Canal A")
scs<-addExposed(scs, at=52, mttf=1/0.21e-6, exposure=tempo_expo, tag="E14",
name="Curto ou circuito", name2="aberto - EFL A")
scs<-addExposed(scs, at=52, mttf=1/0.08e-6, exposure=tempo_expo, tag="E15",
name="Curto ou circuito", name2="aberto - UEH A")
scs<-addExposed(scs, at=52, mttf=1/0.1e-6, exposure=tempo_expo, tag="E16",
name="Curto ou circ. aberto", name2="conector SCM A")
scs<-addLogic(scs, at=51, type="or", name="Canal B")
scs<-addExposed(scs, at=56, mttf=1/0.21e-6, exposure=tempo_expo, tag="E47",
name="Curto ou circuito", name2="aberto - EFL B")
scs<-addExposed(scs, at=56, mttf=1/0.08e-6, exposure=tempo_expo, tag="E48",
name="Curto ou circuito", name2="aberto - UEH B")
scs<-addExposed(scs, at=56, mttf=1/0.1e-6, exposure=tempo_expo, tag="E49",
name="Curto ou circ. aberto", name2="conector SCM B")
scs<-addLogic(scs, at=1, type="or", name="Falha linha retorno", name2="acionamento
hidraulico")
scs<-addLogic(scs, at=60, type="or", name="Falha do filtro", name2="de retorno")
scs<-addExposed(scs, at=61, mttf=1/0.02e-6, exposure=tempo_expo, tag="E45",
name="Filtro entupido", name2="retorno")
scs<-addExposed(scs, at=61, mttf=1/0.53e-6, exposure=tempo_expo, tag="E46",
name="Check retorno", name2="travada")
scs<-addExposed(scs, at=60, mttf=1/0.12e-6, exposure=tempo_expo, tag="E17",
name="Valvula de alivio", name2="travada")
scs<-addExposed(scs, at=60, mttf=1/0.09e-6, exposure=tempo_expo, tag="E18",
name="Dano compensador")
scs<-addLogic(scs, at=1, type="or", name="Falha de comunicacao")
scs<-addLogic(scs, at=66, type="or", name="Falha controlador", name2="de
superficie")
scs<-addExposed(scs, at=67, mttf=1/5.871e-6, exposure=tempo_expo, tag="E19",
name="operacao espuria", name2="saida aleatoria")
scs<-addLogic(scs, at=67, type="and", name="Falha das MCS's", name2="A e B")
scs<-addExposed(scs, at=69, mttf=1/28.23e-6, exposure=tempo_expo, tag="E20",
name="Falha MCS A")
scs<-addExposed(scs, at=69, mttf=1/28.23e-6, exposure=tempo_expo, tag="E37",
name="Falha MCS B")
scs<-addLogic(scs, at=66, type="and", name="Degradacao", name2="meio fisico")
scs<-addLogic(scs, at=72, type="or", name="Canal A")
scs<-addExposed(scs, at=73, mttf=1/0.33e-6, exposure=tempo_expo, tag="E21",
name="Perda isolacao", name2="eletrica - UEH A")
scs<-addExposed(scs, at=73, mttf=1/0.08e-6, exposure=tempo_expo, tag="E22",
name="Falha transmissao", name2="sinal no EFL A")

```

```

scs<-addExposed(scs, at=73, mttf=1/0.03e-6, exposure=tempo_expo, tag="E23",
name="Falhas transmissao", name2="conector SCM A")
scs<-addLogic(scs, at=72, type="or", name="Canal B")
scs<-addExposed(scs, at=77, mttf=1/0.33e-6, exposure=tempo_expo, tag="E38",
name="Perda isolacao", name2="eletrica - UEH B")
scs<-addExposed(scs, at=77, mttf=1/0.08e-6, exposure=tempo_expo, tag="E39",
name="Falha transmissao", name2="sinal no EFL B")
scs<-addExposed(scs, at=77, mttf=1/0.03e-6, exposure=tempo_expo, tag="E40",
name="Falhas transmissao", name2="conector SCM B")
scs<-addLogic(scs, at=1, type="and", name="Falha electronica", name2="submarina -
SCM")
scs<-addLogic(scs, at=81, type="or", name="Eletronica A")
scs<-addExposed(scs, at=82, mttf=1/0.03e-6, exposure=tempo_expo, tag="E24",
name="Falha transformador", name2="de entrada A")
scs<-addExposed(scs, at=82, mttf=1/7.86e-6, exposure=tempo_expo, tag="E25",
name="Falha SEM A")
scs<-addExposed(scs, at=82, mttf=1/12e-6, exposure=tempo_expo, tag="E26",
name="Falha sensores", name2="de pressao A")
scs<-addExposed(scs, at=82, mttf=1/12.24e-6, exposure=tempo_expo, tag="E27",
name="Falha sensores", name2="de vazao/fluxo A")
scs<-addLogic(scs, at=81, type="or", name="Eletronica B")
scs<-addExposed(scs, at=87, mttf=1/0.03e-6, exposure=tempo_expo, tag="E41",
name="Falha transformador", name2="de entrada B")
scs<-addExposed(scs, at=87, mttf=1/7.86e-6, exposure=tempo_expo, tag="E42",
name="Falha SEM B")
scs<-addExposed(scs, at=87, mttf=1/12e-6, exposure=tempo_expo, tag="E43",
name="Falha sensores", name2="de pressao B")
scs<-addExposed(scs, at=87, mttf=1/12.24e-6, exposure=tempo_expo, tag="E44",
name="Falha sensores", name2="de vazao/fluxo B")
scs<-ftree.calc(scs)
study_row<-data.frame(Exposure_Time=tempo_expo, Prob_of_Failure=scs$PBF[1])
TimeStudy<-rbind(TimeStudy, study_row)
}
TimeStudy

#Função para mostrar graficamente a árvore no browser

ftree2html(scs, write_file=TRUE)
browseURL("scs.html")

#Função para plotar o gráfico de prob. de falha x tempo analisado

plot(TimeStudy, log="x", type="l")

#Análise de minimum cut set

scs_cs<-cutsets(scs)

#Linhas abaixo são para associar os TAGs aos nós identificados na análise cut set

```

```
cs_tags1<-apply(scs_cs[[1]], c(1,2),function(x) scs$Tag[which(scs$ID==x)])
cs_tags2<-apply(scs_cs[[2]], c(1,2),function(x) scs$Tag[which(scs$ID==x)])
cs_tags3<-apply(scs_cs[[3]], c(1,2),function(x) scs$Tag[which(scs$ID==x)])
cs_tags4<-apply(scs_cs[[4]], c(1,2),function(x) scs$Tag[which(scs$ID==x)])
```

```
cs_probs1<-apply(scs_cs[[1]], c(1,2),function(x) scs$PBF[which(scs$ID==x)])
cs_probs2<-apply(scs_cs[[2]], c(1,2),function(x) scs$PBF[which(scs$ID==x)])
cs_probs3<-apply(scs_cs[[3]], c(1,2),function(x) scs$PBF[which(scs$ID==x)])
cs_probs4<-apply(scs_cs[[4]], c(1,2),function(x) scs$PBF[which(scs$ID==x)])
```

```
cs_tags1<-cbind(cs_tags1, data.frame('prob'=apply(cs_probs1, 1, function(x) prod(x))))
cs_tags2<-cbind(cs_tags2, data.frame('prob'=apply(cs_probs2, 1, function(x) prod(x))))
cs_tags3<-cbind(cs_tags3, data.frame('prob'=apply(cs_probs3, 1, function(x) prod(x))))
cs_tags4<-cbind(cs_tags4, data.frame('prob'=apply(cs_probs4, 1, function(x) prod(x))))
```

APÊNDICE C – EVENTOS BÁSICOS

Na tabela estão identificados os eventos básicos definidos na árvore de falha. Todos os dados de taxa de falha foram extraídos de (Oreda, 2015) cuja descrição original e página também estão indicadas na tabela.

Evento Básico	Descrição do modo de falha	Taxa falha 10⁻⁶/h	MTTF 10⁶ h	Descrição no OREDA (2015)
E1	Falha estrutural da <i>mounting base</i> do SCM	0,09	11,11	<i>Module base plate, structural deficiency</i> (p.60)
E2	Falha do compensador de fluido dielétrico do SCM	0,09	11,11	<i>Accumulator subsea</i> (p.60)
E3	Falha de vedação da <i>outercan</i>	0,05	20,00	<i>Module base plate, external leakage</i> (p.60)
E4	Falha da DCV de entrada do header de LP	0,33	3,03	<i>Solenoid, critical</i> (p.60)
E5	Filtro entupido na entrada do header de LP	0,02	50,00	<i>Filter, plugged/choked</i> (p.60)
E6	<i>Check</i> de entrada de LP travada	0,53	1,89	<i>Valve, check</i> (p.61)
E7	Vazamento pelo conector hidráulico de LP A	0,10	10,00	<i>Hydraulic coupling, critical</i> (p.60) multiplicado por 20
E8	Vazamento interno ou externo na DCV	4,2	0,24	<i>Solenoid, internal and external leakage</i> (p.60) multiplicado por 20
E9	DCV bloqueada ou presa	0,6	1,67	<i>Solenoid, plugged choked</i> (p.60) multiplicado por 20
E10	Vazamento dos conectores hidráulicos das funções	2,00	0,50	E7 multiplicado por 20 (nº de funções)
E11	Falha na atuação elétrica da solenóide A da DCV	2,0	0,50	<i>Solenoid, fail to function</i> (p.60) multiplicado por 20
E12	Falha na atuação elétrica da solenóide B da DCV	2,0	0,50	Mesmo que E11
E13	Falha no suprimento elétrico da EPU A	5,47	0,18	<i>EPU, critical</i> (p.54)
E14	Curto circuito ou circuito aberto EFL A	0,21	4,76	<i>Power jumper, critical</i> (p.63)
E15	Curto circuito ou circuito aberto no cabo A do UEH	0,08	12,50	<i>Power line, short circuit</i> (p.53)

E16	Curto circuito ou circuito aberto no conector A de entrada SCM	0,10	10,00	<i>Power coupler, critical (p.60)</i>
E17	Válvula de alívio do retorno travada	0,12	8,33	<i>Valve check, plugged (p.61)</i>
E18	Dano no compensador hidráulico de retorno	0,09	11,11	Mesmo que E2
E19	Saída espúria do sistema de superfície	5,87	0,17	<i>MCS, soma de erratic output, fail to function, spurious operation and unknown failure (p.56)</i>
E20	Falha da MCS A	28,23	0,04	<i>MCS, control/signal failure (p.56)</i>
E21	Degradação ou perda da isolamento elétrica cabo A UEH	0,33	3,03	<i>Power line, structural (p.53)</i>
E22	Falha na transmissão do sinal no EFL A	0,08	12,50	<i>Power jumper, transmission (p.63)</i>
E23	Falha na transmissão do sinal no conector A SCM	0,03	33,33	<i>Power coupler, transmission (p.60)</i>
E24	Falha no transformador de entrada A	0,03	33,33	<i>Power supply (p.60)</i>
E25	Falha na SEM A	7,86	0,13	<i>Subsea electronic, critical(p.61)</i>
E26	Falha dos sensores de pressão redundantes A	12,00	0,08	<i>Pressure sensor, critical (p.57)</i>
E27	Falha dos sensores de vazão redundantes A	12,24	0,08	<i>Flow sensor, critical (p.57)</i>
E28	Filtro do suprimento de LP A entupido	0,02	50,00	Mesmo que E5
E29	Check do suprimento de LP A travada	0,53	1,89	Mesmo que E6
E30	Falha da DCV de entrada do header de HP	0,33	3,03	Mesmo que E4
E31	Filtro entupido na entrada do header de HP	0,02	50,00	Mesmo que E5
E32	Check de entrada de HP travada	0,53	1,89	Mesmo que E6
E33	Vazamento pelo conector hidráulico de HP A	0,10	10,00	Mesmo que E7
E34	Filtro do suprimento de HP A entupido	0,02	50,00	Mesmo que E5
E35	Check do suprimento de HP A travada	0,53	1,89	Mesmo que E6
E36	Falha no suprimento elétrico da EPU B	5,47	0,18	Mesmo que E13

E37	Falha da MCS B	28,23	0,04	Mesmo que E20
E38	Degradação ou perda da isolação elétrica cabo B UEH	0,33	3,03	Mesmo que E21
E39	Falha na transmissão do sinal no EFL B	0,08	12,50	Mesmo que E22
E40	Falha na transmissão do sinal no conector B SCM	0,03	33,33	Mesmo que E23
E41	Falha no transformador de entrada B	0,03	33,33	Mesmo que E24
E42	Falha na SEM B	7,86	0,13	Mesmo que E25
E43	Falha dos sensores de pressão redundantes B	12,00	0,08	Mesmo que E26
E44	Falha dos sensores de vazão redundantes B	12,24	0,08	Mesmo que E27
E45	Filtro de retorno entupido	0,02	50,00	Mesmo que E5
E46	Check de retorno travada ou bloqueada	0,53	1,89	Mesmo que E6
E47	Curto circuito ou circuito aberto EFL B	0,21	4,76	Mesmo que E14
E48	Curto circuito ou circuito aberto no cabo B do UEH	0,08	12,50	Mesmo que E15
E49	Curto circuito ou circuito aberto no conector B de entrada SCM	0,10	10,00	Mesmo que E16
E50	Vazamento pelo conector hidráulico de LP B	0,10	10,00	Mesmo que E7
E51	Filtro do suprimento de LP B entupido	0,02	50,00	Mesmo que E5
E52	Check do suprimento de LP B travada	0,53	1,89	Mesmo que E6
E53	Vazamento pelo conector hidráulico de HP B	0,10	10,00	Mesmo que E7
E54	Filtro do suprimento de HP B entupido	0,02	50,00	Mesmo que E5
E55	Check do suprimento de HP B travada	0,53	1,89	Mesmo que E6

APÊNDICE D – MINIMAL CUT SET (CORTES MÍNIMOS)

Nº do corte	Eventos	Prob. de Falha	1 - PF	Peso relativo
1	E1	0,002382900000	0,997617100000	0,197838180580%
2	E2	0,002382900000	0,997617100000	0,197838180580%
3	E3	0,001324600000	0,998675400000	0,109973752149%
4	E4	0,008709700000	0,991290300000	0,723115196355%
5	E30	0,008709700000	0,991290300000	0,723115196355%
6	E10	0,051637000000	0,948363000000	4,29%
7	E17	0,003176000000	0,996824000000	0,263684611826%
8	E18	0,002382900000	0,997617100000	0,197838180580%
9	E8	0,105360000000	0,894640000000	8,747421505670%
10	E9	0,015779000000	0,984221000000	1,310037622798%
11	E45	0,000530030000	0,999469970000	0,044005275443%
12	E46	0,013951000000	0,986049000000	1,16%
13	E19	0,144130000000	0,855870000000	11,97%
14	E5,E6	0,000007394449	0,999992605551	0,000613917637%
15	E31,E32	0,000007394449	0,999992605551	0,000613917637%
16	E11,E12	0,002666380000	0,997333620000	0,221373858716%
17	E13,E36	0,018219600000	0,981780400000	1,51%
18	E20,E37	0,277570900000	0,722429100000	23,05%
19	E24,E41	0,000000631946	0,999999368055	0,000052466720%
20	E24,E42	0,000149514200	0,999850485800	0,012413285198%
21	E24,E43	0,000216600000	0,999783400000	0,017983024849%
22	E24,E44	0,000220272700	0,999779727300	0,018287947543%
23	E25,E41	0,000149514200	0,999850485800	0,012413285198%
24	E25,E42	0,035374090000	0,964625910000	2,94%
25	E25,E43	0,051246160000	0,948753840000	4,25%
26	E25,E44	0,052115090000	0,947884910000	4,33%
27	E26,E41	0,000216600000	0,999783400000	0,017983024849%
28	E26,E42	0,051246160000	0,948753840000	4,25%
29	E26,E43	0,074239900000	0,925760100000	6,16%
30	E26,E44	0,075498710000	0,924501290000	6,27%
31	E27,E41	0,000220272700	0,999779727300	0,018287947543%
32	E27,E42	0,052115090000	0,947884910000	4,33%
33	E27,E43	0,075498710000	0,924501290000	6,27%
34	E27,E44	0,076778870000	0,923221130000	6,37%
35	E7,E50	0,000007008727	0,999992991273	0,000581893406%
36	E33,E53	0,000007008727	0,999992991273	0,000581893406%
37	E21,E38	0,000075858870	0,999924141130	0,006298116086%
38	E21,E39	0,000018451500	0,999981548500	0,001531919589%

39	E21,E40	0,000006923776	0,999993076224	0,000574840424%
40	E22,E38	0,000018451500	0,999981548500	0,001531919589%
41	E22,E39	0,000004488042	0,999995511958	0,000372615747%
42	E22,E40	0,000001684102	0,999998315898	0,000139821090%
43	E23,E38	0,000006923776	0,999993076224	0,000574840424%
44	E23,E39	0,000001684102	0,999998315898	0,000139821090%
45	E23,E40	0,000000631946	0,999999368055	0,000052466720%
46	E14,E47	0,000030818040	0,999969181960	0,002558640716%
47	E14,E48	0,000011760640	0,999988239360	0,000976416811%
48	E14,E49	0,000014696780	0,999985303220	0,001220187257%
49	E15,E47	0,000011760640	0,999988239360	0,000976416811%
50	E15,E48	0,000004488042	0,999995511958	0,000372615747%
51	E15,E49	0,000005608517	0,999994391483	0,000465642200%
52	E16,E47	0,000014696780	0,999985303220	0,001220187257%
53	E16,E48	0,000005608517	0,999994391483	0,000465642200%
54	E16,E49	0,000007008727	0,999992991273	0,000581893406%
55	E7, E51, E52	0,000000019576	0,999999980424	0,000001625285%
56	E28, E29, E50	0,000000019576	0,999999980424	0,000001625285%
57	E33, E54, E55	0,000000019576	0,999999980424	0,000001625285%
58	E34, E35, E53	0,000000019576	0,999999980424	0,000001625285%
59	E28, E29, E51, E52	0,000000000055	0,999999999945	0,000000004540%
60	E34, E35, E54, E55	0,000000000055	0,999999999945	0,000000004540%

APÊNDICE E – ÁRVORE DE FALHA DO SISTEMA DE CONTROLE SUBMARINO

