



COPPE/UFRJ

ESTUDO DA CONFIABILIDADE FUNCIONAL DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA
ELÉTRICA, DE AUTOMAÇÃO E DE LASTRO PARA A MANUTENÇÃO DO
EQUILÍBRIO DE UMA PLATAFORMA FPSO

Gustavo Cruzeiro da Rocha

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientadores: José Marcio do Amaral Vasconcellos
Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Rio de Janeiro
Dezembro de 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ESTUDO DA CONFIABILIDADE FUNCIONAL DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA
ELÉTRICA, DE AUTOMAÇÃO E DE LASTRO PARA A MANUTENÇÃO DO
EQUILÍBRIO DE UMA PLATAFORMA FPSO

Gustavo Cruzeiro Rocha

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Aprovada por:

Prof. José Marcio do Amaral Vasconcellos D.Sc.

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc.

Prof. Murilo Augusto Vaz, Ph D.

Dr. Marcelo Fernandes Mendes, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

Dezembro de 2008

Rocha, Gustavo Cruzeiro

Estudo da confiabilidade funcional dos sistemas de potência elétrica, de automação e de lastro para a manutenção do equilíbrio de uma plataforma FPSO – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2008.

XVII,135 p.: Il.; 29,7 cm.

Orientadores: José Márcio do Amaral Vasconcellos

Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2008.

Referências Bibliográficas: p.113-117.

1. Análise de Riscos e Confiabilidade. I. Vasconcellos, José Márcio do Amaral, et al II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

Dedico esse trabalho à minha família, que esteve e continua sempre presente em todos os momentos de minha vida. Sem seu incentivo, dedicação e apoio seria impossível seguir adiante.

“Se pude ver mais longe, é porque estava me apoiando em ombros de Gigantes”.

(Isaac Newton)

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Professor José Marcio do Amaral Vasconcellos e Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo pelo suporte dado nesta empreitada.

Aos demais professores da banca, Murilo Vaz e Marcelo Mendes pelos comentários pertinentes e objetivo os quais enriqueceram este trabalho.

À minha esposa Daniela, pelo incentivo constante e pela compreensão em relação às minhas ausências ao longo do mestrado.

Ao suporte incomensurável de Ananda Xavier de Almeida Bastos da Oceaneering, esta pequena grande, sem a qual não seria possível terminar a dissertação no prazo.

Aos colegas engenheiros do Bureau Veritas do Brasil: Emmanuel Soares, Marcus Hartfelder, Eliezer Magliano, Fernando Gracia e Jolmar Rezende pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Especial agradecimento à Maria Margarida Tinoco, Márcio Pereira e Marcelo Mendes, pelas horas “liberadas” e apoio irrestrito ao mestrado.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DA CONFIABILIDADE FUNCIONAL DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA ELÉTRICA, DE AUTOMAÇÃO E DE LASTRO PARA A MANUTENÇÃO DO EQUILÍBRIO DE UMA PLATAFORMA FPSO

Gustavo Cruzeiro Rocha

Dezembro/2008

Orientadores: José Marcio do Amaral Vasconcellos

Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho tem como objetivo avaliar a probabilidade de recuperação da condição de equilíbrio de uma plataforma tipo FPSO num cenário de emergência, a partir do cálculo da confiabilidade funcional, considerando-se falhas críticas nos sistemas de potência elétrica, automação e intertravamento de segurança, potência hidráulica, lastro e carga da plataforma.

A partir de uma análise de riscos prévia utilizando-se a técnica chamada de “análise de modos, efeitos e criticidade de falha (FMECA)”, realizada por especialistas, foram identificadas as falhas funcionais mais críticas dos sistemas analisados e com estas foram elaboradas árvores de falhas as quais permitiram mensurar a confiabilidade funcional de cada sistema para a manutenção do equilíbrio da plataforma.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

FUNCTIONAL RELIABILITY STUDY OF THE ELECTRICAL POWER SYSTEM,
AUTOMATION SYSTEM AND BALLAST SYSTEM TO MAINTAIN THE BALANCE
OF A FPSO PLATFORM

Gustavo Cruzeiro Rocha

December/2008

Advisors: José Marcio do Amaral Vasconcellos

Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Program: Oceanic Engineering

The purpose of this work is to evaluate the probability of a FPSO platform to recover its balance condition on an emergency scenario, using functional reliability calculations to address critical failures modes on the electrical power system, the automation and safety interlock system, hydraulic power system, and the ballast and load systems of the platform.

Based on a previous risk analysis according to the technique so called “failure mode, effect and criticality analysis (FMECA)”, performed by specialists, it was possible to identify the most critical functional failures from the analyzed systems and use them to built fault tree analysis to measure the functional reliability for each system in order to restore the balance of the platform.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1	Plataforma P-36 naufragando na Bacia de Campos.....	2
Figura 1.2	Plataforma P-34 adernada na Bacia de Campos.....	3
Figura 1.3	Campo de Barracuda e Caratinga.....	5
Figura 1.4	Plataforma FPSO Petrobras-48.....	5
Figura 2.1	Módulos Funcionais	15
Figura 2.2	Fluxograma das etapas de um FMECA Funcional.....	16
Figura 2.3	Matriz de risco.....	19
Figura 2.4	Representação gráfica da função densidade de probabilidade,.....	21
Figura 2.5	Representação gráfica da função densidade acumulada,	22
Figura 2.6	Curva da banheira.....	27
Figura 2.7	Gráfico $f(t)$ – distribuição exponencial.....	29
Figura 2.8	Gráfica $R(t)$ – distribuição exponencial.....	29
Figura 2.9	Gráfico $\lambda(t)$ – distribuição exponencial.....	30
Figura 2.10	Gráficos $\lambda(t)$ de padrões de falhas.....	31
Figura 2.11	Gráfico da função densidade acumulada χ^2	32
Figura 2.12	Representação gráfica do evento topo.....	35
Figura 2.13	Representação gráfica do evento falha.....	35
Figura 2.14	Representação gráfica do evento primário.....	36
Figura 2.15	Representação gráfica do portão “OU”.....	36
Figura 2.16	Representação gráfica do portão “E”.....	36
Figura 2.17	Representação gráfica da transferência.....	37
Figura 3.1	Diagrama de blocos SPE.....	43
Figura 3.2	Matriz de riscos por função. SPE, plataforma P-A.....	51
Figura 3.3	Diagrama de blocos SAIS.....	55
Figura 3.4	Matriz de riscos por função SAIS da plataforma P-A.....	61
Figura 3.5	Diagrama de blocos SLC.....	64
Figura 3.6	Matriz de riscos por função SLC da Plataforma P-A.....	70
Figura 3.7	Diagrama de blocos SPH.....	72
Figura 3.8	Matriz de riscos por função SPH da plataforma P-A.....	74
Figura 3.9	Risco de perda da função P-A.....	77

Figura 4.1	Função confiabilidade versus tempo, SPE P-A.....	87
Figura 4.2	Função confiabilidade versus tempo, SAIS P-A.....	91
Figura 4.3	Função confiabilidade versus tempo, SLC P-A.....	94
Figura 4.4	Função confiabilidade versus tempo, SPH P-A.....	97
Figura 4.5	MTTF do sistema SAIS em função dos MTTF de entrada.....	101
Figura 4.6	Confiabilidade do sistema SAIS em função dos MTTF de entrada.....	102
Figura 4.7	Número de falhas esperadas do sistema SAIS	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	FPSO em operação na Bacia de Campos.....	6
Tabela 2.1	Categorias de frequência.....	17
Tabela 2.2	Categorias de severidade dos efeitos.....	18
Tabela 3.1	Lista de funções determinadas (SPE).....	48
Tabela 3.2	Estatística da FMECA (SPE).....	50
Tabela 3.3	Lista de ações por função crítica – SPE.....	52
Tabela 3.4	Lista de ações por função moderada – SPE.....	53
Tabela 3.5	Lista de funções determinadas (SAIS).....	59
Tabela 3.6	Estatística da FMECA (SAIS).....	60
Tabela 3.7	Lista de ações por função crítica – SAIS.....	61
Tabela 3.8	Lista de ações por função moderada – SAIS.....	62
Tabela 3.9	Características da bomba de lastro.....	65
Tabela 3.10	Características do edutor de lastro.....	65
Tabela 3.11	Características da bomba de esgoto e serviços gerais.....	66
Tabela 3.12	Características do tanque de lastro.....	66
Tabela 3.13	Características da bomba de carga.....	66
Tabela 3.14	Características dos tanques de carga.....	66
Tabela 3.15	Lista de funções determinadas (SLC).....	69
Tabela 3.16	Estatística da FMECA (SLC).....	69
Tabela 3.17	Lista de ações por função crítica – SLC P-A.....	70
Tabela 3.18	Lista de ações por função moderada – SLC P-A.....	71
Tabela 3.19	Lista de funções determinadas (SPH).....	73
Tabela 3.20	Estatística da FMECA (SPH).....	73
Tabela 3.21	Lista de ações por função crítica – SPH.....	75
Tabela 3.22	Lista de ações por função moderada– SPH.....	75
Tabela 3.23	Análise do risco de perda da função (FPSO P-A).....	76
Tabela 4.1	Categorias de frequência para a FTA.....	81
Tabela 4.2	Frequência de falha SPE P-A.....	82
Tabela 4.3	Frequência de falha SAIS P-A.....	83

Tabela 4.4	Frequência de falha SLC P-A.....	84
Tabela 4.5	Frequência de falha SPH P-A.....	85
Tabela 4.6	Resultados FTA SPE.....	87
Tabela 4.7	Resultados FTA SAIS.....	91
Tabela 4.8	Resultados FTA SLC.....	95
Tabela 4.9	Resultados FTA SPH.....	98
Tabela 4.10	MTTF utilizados.....	100
Tabela 4.11	Quadro comparativo dos resultados.....	101
Tabela 4.12	Confiabilidade calculada por sistema.....	104
Tabela 5.1	Valores de referência para a estimação de β	111

LISTA DE SIGLAS

BT – Bateria

CB – Carregador de bactéria

CIS – Control and Interlocking System

CMS – Estação de trabalho

ECOS – Estação Central de Operação e Supervisão

EGCP – Painel de Controle do Gerador de Emergência

ESD – Emergency Shutdown

ET- Especificação Técnica

F&G – Fogo e Gás

FMECA – Failure Mode, Effect and Criticality Analysis (Análise de Modos, Efeitos e Criticidade de Falha)

FPSO – Floating Production Storage and Offloading

FTA – Fault Tree Analysis (Análise por Árvore de Falhas)

GE – Gerador de Emergência

HPU – Hydraulic Power Unit

IEC - International Electrotechnical Commission

IHM – Interface Homem-Máquina

MB – Moto-bomba

MCC – Motor Control Centre

MTTF – Mean Time To Failure (Tempo Médio para Falhar)

OREDA – Offshore Reliability Data

P-A – Plataforma fictícia “A”

PEO – Programa de Excelência Operacional

PLC – Controlador Lógico Programável

PN – Painel Elétrico

SAIS – Sistema de Automação e Intertravamento de Segurança

SIL – Safety Integrity Level

SINPEP – Sistema Informatizado de Padronização Eletrônica da Petrobras

SLC – Sistema de Lastro e Carga

SOLAS – Safety of Life at Sea

SPE – Sistema de Potência Elétrica

SPH – Sistema de Potencia Hidráulica

TG – Turbo Gerador

TQ – Tanque

UAL – United Airlines

UPS – Uninterruptible Power Supply

VAC- Ventilação e Ar Condicionado

VPI – Indicador Volumétrico de Posição

VSD – Variador de Frequência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação.....	2
1.2	Unidades Marítimas Flutuantes FPSO.....	4
1.3	Objetivo da Dissertação.....	7
1.4	Apresentação da Dissertação.....	8
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	10
2.1	Terminologia básica sobre Análise de Riscos.....	10
2.2	Análise de Modos, Efeitos e Criticidade de Falha – FMECA.....	12
2.3	Conceitos Básicos de Estatística e Confiabilidade.....	20
2.4	Conceitos de falha.....	25
2.5	Distribuições Estatísticas.....	28
2.5.1	Distribuição Exponencial.....	28
2.5.2	Distribuição chi quadrado.....	31
2.6	Limites de confiança.....	32
2.7	Modelagem por Árvores de Falha.....	33
2.7.1	Simbologia utilizada.....	35
2.7.2	Cálculos da FTA – Abordagem Quantitativa.....	37
3	APLICAÇÃO DA ANÁLISE QUALITATIVA DE RISCO – FMECA.....	39
3.1	Escopo.....	40
3.2	Premissas do estudo.....	41
3.3	Sistema de Potência Elétrica (SPE).....	41
3.3.1	Descrição do sistema SPE.....	41
3.3.1.1	Fontes de Suprimento de Energia Elétrica.....	43
3.3.1.2	Sistemas de distribuição.....	45
3.3.2	Resultados da FMECA para o Sistema SPE.....	48
3.4	Sistema de automação e intertravamento de segurança (SAIS).....	54
3.4.1	Descrição do Sistema (SAIS).....	54
3.4.1.1	CIS (Control and Interlocking System).....	55
3.4.1.2	Supervisão ECOS (Estação Central de Operação e Supervisão).....	57

3.4.1.3	Unidades terminais remotas.....	58
3.4.1.4	Instrumentos sensores.....	58
3.4.1.5	Atuadores.....	58
3.4.2	Resultados da FMECA para o sistema SAIS.....	59
3.5	Sistema de Lastro e Carregamento (SLC).....	63
3.5.1	Descrição do sistema (SLC).....	63
3.5.1.1	Equipamentos e tanques.....	65
3.5.1.2	Operação Lastro/Deslastro.....	67
3.5.1.3	Operação Lastro/Deslastro dos <i>peak</i> tanques de ré.....	67
3.5.1.4	Lastro/Deslastro e transferência de carga dos tanques de carga 5 P/C/S.....	68
3.5.2	Resultados da FMECA para o sistema SLC.....	68
3.6	Sistema de Potência Hidráulica (SPH).....	71
3.6.1	Descrição do sistema (SLC).....	71
3.6.2	Resultados da FMECA para o sistema SLC.....	73
3.7	Resultados Globais FMECA FPSO P-A.....	76
4	ANÁLISE QUANTITATIVA POR ÁRVORE DE FALHAS.....	78
4.1	Premissas do modelo de arvore de falhas.....	78
4.2	Dados de entrada para a FTA.....	80
4.2.1	Dados de entrada sistema de potência elétrica – SPE.....	81
4.2.2	Dados de entrada sistema de automação e intertravamento de segurança – SAIS	83
4.2.3	Dados de entrada sistema de lastro e carga – SLC.....	84
4.2.4	Dados de entrada sistema de potência hidráulica – SPH.....	85
4.3	Resultados da Análise Qualitativa.....	86
4.3.1	Sistema de Potência Elétrica SPE P-A.....	86
4.3.2	Sistema de automação e intertravamento de segurança SAIS P-A.....	89
4.3.3	Sistema de lastro e carga SLC P-A.....	93
4.3.4	Sistema de potência hidráulica SPH P-A.....	96
4.4	Estudo de sensibilidade.....	100
4.5	Considerações finais – FTA.....	104
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	106
5.1	Conclusões.....	106

5.1.1	Conclusões análise qualitativa - FMECA.....	106
5.1.2	Conclusões análise quantitativa - FTA.....	108
5.2	Recomendações.....	109
	REFERÊNCIAS.....	113
	APÊNDICES.....	118

1 INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo nacional tem papel importante no desenvolvimento econômico e na soberania do país, sobretudo a partir de 2006 quando foi conquistada a auto-suficiência na produção de petróleo. A produção média diária ao final deste ano chegou a 1.910.000 barris superando a demanda nacional de petróleo.

Devido à formação geológica do continente brasileiro, o petróleo nacional encontra-se em maior quantidade em sua costa, a profundidades cada vez maiores. O futuro mostra-se ainda promissor com novas descobertas de óleo em grandes quantidades nas camadas de pré-sal, em águas ultra-profundas.

A produção *offshore* em profundidades cada vez maiores representa um constante desafio tecnológico para a indústria petrolífera. Não basta expandir a exploração e a produção de forma pioneira em águas cada vez mais profundas, deve-se ainda manter a segurança e a confiabilidade das operações em níveis aceitáveis.

Incidentes e acidentes não são raros nas unidades de produção marítimas. Este fato ocorre principalmente pelo risco inerente aos processos de produção das unidades que contêm fluidos com potencial tóxico e inflamável, complexas rotinas de operação e manutenção, falhas humanas e procedimentos inadequados que podem levar à ocorrência de falhas.

A indústria de petróleo investe milhões de dólares em programas de gerenciamento da integridade de seus ativos todos os anos. Entretanto, continuam sofrendo com paradas não programadas provocadas por falhas em seus equipamentos, que além do prejuízo financeiro, aumentam as estatísticas de acidentes e impactos ambientais. O grande desafio destas companhias é determinar o que deve ser feito e em que ativos de suas plantas

(sistemas e equipamentos) elas devem focar os esforços para diminuir o número de paradas desnecessárias, aumentar a segurança de suas operações e diminuir os acidentes com impactos ambientais.

1.1 Motivação

A partir do trágico acidente com a Plataforma Semi-Submersível Petrobras-36 em 20/03/2001 no campo de Roncador na Bacia de Campos conforme Figura 1.1 publicada pela revista Época e que causou a morte de 11 pessoas e um prejuízo material de mais US\$ 1 bilhão, a Petrobras lançou o Programa de Excelência Operacional (PEO) com uma série de tarefas para melhorar a segurança e a confiabilidade operacional nas unidades marítimas de produção da companhia.



Figura 1.1 - Plataforma P-36 naufragando na Bacia de Campos.

Em 13/10/2002, houve o incidente com o FPSO Petrobras-34 onde falhas nas interfaces elétricas e de automação provocadas por um erro de manutenção, acarretaram a abertura indevida das válvulas que interligavam os tanques de lastro e de carga localizados

no casco do navio-plataforma levando a unidade a um adernamento de 32 graus conforme Figura 1.2. publicada pelo jornal do Brasil em 14 de outubro de 2002. A produção foi interrompida e a tripulação, juntamente com os operadores da unidade, foi desembarcada com segurança.



Figura 1.2 - Plataforma P-34 adernada na Bacia de Campos.

Após o incidente da P-34 a Petrobras intensificou os esforços associados ao seu programa de excelência operacional e junto ao mercado, desenvolveu uma metodologia qualitativa para a análise de risco e confiabilidade da interação entre os sistemas de potência elétrica e de automação em plataformas de produção conforme trabalho publicado por MONTEIRO *et al.* (2005). Esta metodologia passou a ser implantada de forma sistemática nos novos projetos de unidades flutuantes da unidade de negócios Petrobras UN-Rio a partir de 2005, através da instituição da tarefa número 15 do programa de excelência operacional da Petrobras. Foi criada a especificação técnica ET-3000.00-5400-983-PAK-001 (2005) cujo objetivo era a realização de análises qualitativas de risco e de confiabilidade das interações entre os sistemas de potência elétrica e de automação, de forma a avaliar possíveis seqüências de eventos que pudessem levar as unidades marítimas

flutuantes de produção à situação crítica de flutuação e estabilidade como havia ocorrido com o FPSO P-34.

A Petrobras UN-Rio com o suporte de diferentes empresas de consultoria, aplicou esta metodologia em diversas unidades de produção, tanto para plataformas do tipo semi-submersíveis quanto para plataformas do tipo FPSO.

A motivação para este trabalho consiste na possibilidade de usar os resultados obtidos em uma destas análises qualitativas de risco para a realização de um estudo quantitativo de confiabilidade funcional usando os dados de frequência de falhas dos cenários considerados intoleráveis como dados de entrada. Este estudo de caso aplicado possibilitará uma análise crítica da metodologia a partir dos resultados quantitativos alcançados, cujo foco é a probabilidade de manutenção da condição de equilíbrio da plataforma em um cenário de emergência considerando-se potenciais falhas funcionais nos sistemas de potência elétrica, automação e intertravamento, potência hidráulica, lastro e carga.

1.2 Unidades Marítimas Flutuantes FPSO

A plataforma *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO) é um tipo de unidade flutuante utilizado pela indústria petrolífera para exploração, armazenamento de petróleo e/ou gás natural e escoamento da produção por navios aliviadores. São utilizados em locais de produção distantes da costa com inviabilidade de ligação por oleodutos ou gasodutos conforme ilustrado na Figura 1.3, onde se exemplifica a aplicação das plataformas FPSO Petrobras P-43 e P-48 nos campos petrolíferos de Barracuda e Caratinga na Bacia de Campos.

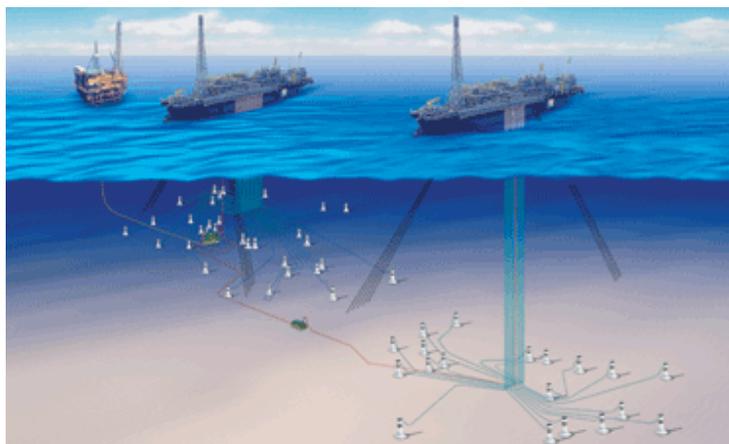


Figura 1.3 – Campo de Barracuda e Caratinga.

No convés do navio é instalada uma planta de processo para separar e tratar os fluidos produzidos pelos poços. Depois de separado da água e do gás, o petróleo é armazenado nos tanques do próprio navio, sendo frequentemente transferido para um navio aliviador. A Figura 1.4 ilustra o FPSO Petrobras P-48 em produção. É possível perceber o *flare* da unidade queimando os gases residuais do processo.



Figura 1.4 – Plataforma FPSO Petrobras-48.

O navio aliviador é um petroleiro que atraca na popa ou na proa do FPSO para receber petróleo que foi armazenado em seus tanques e transportá-lo para terra. O gás comprimido é enviado para terra através de gasodutos e/ou re-injetado no reservatório. Os maiores FPSO têm sua capacidade de processo em torno de 200 mil barris de petróleo por dia, com produção associada de gás de aproximadamente 4 milhões de metros cúbicos por dia.

Na Bacia de Campos, a Petrobras possui uma grande frota de FPSO em operação conforme ilustrado na Tabela 1.1. publicada no site da Petrobras na internet.

Tabela 1.1 – FPSO em Operação na Bacia de Campos.

Bacia de Campos						
Sigla da Plataforma	Tipo	Lâmina d'Água (m)	Poços (produtores/injetores)	Capacidade de produção de óleo (mil bpd)	Capacidade de produção de gás (mil m³/d)	Capacidade de armazenamento de óleo (mil bbl)
ESPF	FPSO	800	8/10	100	2500	1700
FPSO-RJ	FPSO	1350	5/4	100	2500	1600
FPSO-FLU (Shell)	FPSO	800	9/6	80	61	1200
P-31	FPSO	330	23/0	200	2900	1760
P-33	FPSO	780	6/2	63	1500	2000
P-35	FPSO	850	06/12	130	3000	1500
P-37	FPSO	905	17/12	180	4600	1600
FPSO-BR	FPSO	1290	9/3	100	1800	1600
FPSO-MLS	FPSO	1200	6/5	100	2300	1600
P-43	FPSO	800	20/14	150	6000	2000
P-48	FPSO	1040	13/8	150	6000	2000
P-50	FPSO	1240	17/15	180	6000	1700

Além das unidades listadas na Tabela 1.1, existe ainda o FPSO P-54, que começou a operar no dia 11 de dezembro de 2007, no campo de Roncador, na Bacia de Campos (RJ). Estima-se que ela acrescentará 180 mil barris por dia (bpd) à produção nacional no auge de sua produção.

Este ano duas outras unidades de produção entraram em operação: o FPSO Cidade de Vitória, no campo de Golfinho, na Bacia do Espírito Santo, com capacidade para produzir 100 mil barris por dia e o FPSO Cidade do Rio de Janeiro, com capacidade para produzir 100 mil bpd no campo de Espadarte, na Bacia de Campos.

Evidenciada sua relevância para a indústria petrolífera nacional, sobretudo na Bacia de Campos, litoral norte do estado do Rio de Janeiro, e baseado no incidente da unidade P-34, optou-se pela aplicação do estudo de caso para a conversão dos resultados qualitativos obtidos através da metodologia de análise de riscos do programa de excelência operacional (PEO) em um estudo quantitativo de confiabilidade de uma plataforma do tipo FPSO.

1.3 Objetivo da Dissertação

O objetivo desta dissertação é apresentar um caso prático de aplicação para a conversão dos resultados da análise qualitativa de riscos através da técnica de Análise de Modos, Efeitos e Criticidade de Falha (FMECA) aplicado aos sistemas de uma plataforma tipo FPSO em um estudo de confiabilidade funcional por árvore de falhas utilizando as mesmas premissas e as mesmas frequências de falha.

O estudo qualitativo de FMECA funcional foi realizado com base nos resultados de um trabalho elaborado conforme a norma ET-3000.00-5400-983-PAK-001 (2004) e na experiência de uma equipe de especialistas formado tanto pela Petrobras quanto por uma empresa de consultoria, onde toda a documentação pertinente foi analisada antes e durante as reuniões de FMECA.

Por uma questão de confidencialidade, o nome da unidade flutuante de produção utilizada como exemplo de aplicação deste trabalho não foi citado no texto e seus dados foram atribuídos à fictícia “plataforma FPSO P-A”.

O estudo de confiabilidade funcional foi desenvolvido utilizando-se tanto a lógica para a ocorrência de falhas funcionais cuja criticidade foi considerada intolerável (cenários críticos e moderados), quanto os valores numéricos para as frequências de falha estimadas pelos especialistas.

A discussão acerca dos resultados gerados pela análise de confiabilidade funcional estimada a partir do FMECA torna-se uma importante ferramenta para analisar criticamente à metodologia proposta pela especificação técnica da Petrobras ET-3000.00-5400-983-PAK-001 (2004) e os objetivos que levaram a Petrobras a implantar a tarefa 15 do Programa de Excelência Operacional.

1.4 Apresentação da Dissertação

O Capítulo 2 apresenta uma revisão dos fundamentos teóricos necessários ao entendimento da dissertação quanto aos termos e definições relacionados com a análise de riscos e engenharia da confiabilidade. São apresentados os conceitos de análise de riscos através da técnica de FMECA qualitativo, conceitos básicos de estatística, taxas de falhas, curva da banheira e as distribuições estatísticas exponencial e do chi quadrado. Aborda ainda os principais parâmetros de confiabilidade, limites de confiança e a técnica de modelagem por árvores de falha.

No Capítulo 3 é apresentada a análise de riscos qualitativa executada para a plataforma FPSO P-A usando a técnica de FMECA conforme estabelecido na ET-3000.00-

5400-983-PAK-001 (2004). São apresentados os principais sistemas que fizeram parte do escopo da análise: Sistema de potência elétrica (SPE), automação e intertravamento de segurança (SAIS), lastro e carga (SLC) e potência hidráulica (SPH). São apresentadas as funções identificadas para cada sistema assim como suas respectivas criticidades. São ilustradas as matrizes de riscos e as análises estatísticas. Ao final do capítulo, são apresentados os resultados, recomendações e observações para cada sistema.

O Capítulo 4 apresenta a técnica usada para estimar a confiabilidade funcional dos sistemas, a modelagem por árvore de falhas. São apresentadas as premissas adotadas e os dados de entrada para os modelos quantitativos referentes a cada sistema analisado da unidade marítima FPSO P-A com base nos dados da FMECA, as faixas de probabilidade e a criticidade de cada função. São apresentados os resultados para os eventos de topo e os cálculos dos limites de confiança para o parâmetro “Tempo Médio para Falhar (MTTF)” de cada sistema modelado como forma de verificar a incerteza dos valores obtidos. Ao final do capítulo são apresentados os resultados da análise de sensibilidade do método utilizado para a avaliação quantitativa em função dos dados iniciais das faixas de probabilidade incluindo tanto os valores máximos quanto os valores mínimos.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões com base nos resultados apresentados nos capítulos 3 e 4. É discutido o que pode ser feito com os resultados alcançados e qual a sua utilidade para as partes interessadas. Contempla, ainda, as recomendações com base nos resultados e conclusões da dissertação que complementam a abrangência da análise.

Nos apêndices A e B respectivamente, estão disponíveis um modelo da planilha de FMECA (avaliação qualitativa) e as árvores de falhas geradas para cada sistema da plataforma FPSO P-A (avaliação quantitativa).

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para tornar possível a análise e compreensão dos resultados obtidos pela análise de riscos qualitativa através da técnica de FMECA e posteriormente os resultados do estudo quantitativo de confiabilidade através da técnica de modelagem por árvore de falhas, faz-se necessário introduzir alguns conceitos básicos sobre estas metodologias.

2.1 Terminologia básica sobre Análise de Riscos

De acordo com a norma API BRD 581 (2000), perigo é a fonte de um potencial ferimento ou uma situação que possa causar prejuízos. Segundo a norma Petrobras N-2784 (2005), é o potencial de qualquer estado da matéria, evento ou circunstância que possa causar danos às pessoas e/ou propriedades e/ou meio ambiente. O perigo é inerente à atividade ou ao processo e não pode ser eliminado sem que sejam alteradas as características dos mesmos.

Ainda segundo o API BRD 581 (2000), o risco é o produto de dois termos separados – a probabilidade de que um evento irá ocorrer e a consequência deste evento. A definição de risco segundo a norma Petrobras N-2784 (2005), é a medida de perdas econômicas, danos ambientais ou lesões humanas em termos da probabilidade de ocorrência de um evento (frequência) e magnitude das perdas, dano ao ambiente e/ou de lesões (consequências). Definido também por RAUSAND (2001), como uma expressão da probabilidade e das consequências de um evento acidental.

Como o perigo é uma característica inerente, é através do risco, ou seja, da probabilidade de uma falha ocorrer e a consequência desta falha, que se avalia a tolerabilidade das atividades e ou processos.

O conceito de risco, segundo LAFRAIA (2001) está intimamente relacionado à presença de situações indesejáveis, sob o ponto de vista do usuário do sistema, produto ou equipamento e demais partes interessadas tais como comunidades que residem no entorno de empreendimentos industriais e a própria sociedade. Se estas situações indesejáveis implicarem em risco de vidas humanas e ou prejuízos econômicos financeiros de elevado valor, considerados não toleráveis, devem ser adotados esforços adicionais no sentido de minimizar, mitigar ou até mesmo evitar que estas situações ocorram.

Análise de riscos segundo a norma Petrobras N-2784 (2005), é a designação genérica da atividade que consiste na aplicação de uma ou mais técnicas estruturadas, através das quais são identificados os perigos e suas respectivas causas e consequências sobre pessoas, meio ambiente e instalações e geradas recomendações de prevenção e mitigação.

Para LAFRAIA (2001), são realizadas para o estabelecimento de uma base sólida para decisões concernentes aos riscos. Uma análise de riscos nunca deve ser iniciada sem que se tenha definido previamente o que será considerado tolerável e quais são os dados necessários para se tomar estas decisões.

Basicamente a análise de riscos deve responder a três perguntas:

1. O que pode dar errado? A resposta a esta pergunta caracteriza a identificação dos perigos.
2. Qual a probabilidade disto acontecer? A resposta a esta pergunta caracteriza a Análise de frequência/probabilidade.

3. Quais são as conseqüências caso o evento ocorra? A resposta a esta pergunta caracteriza a Análise de conseqüência.

2.2 Análise de Modos, Efeitos e Criticidade de Falha - FMECA

Segundo a norma Petrobras N-2784 (2005), chama-se de FMECA, Análise de Modos, Efeitos e Criticidade de Falha, à técnica indutiva estruturada para identificar modos de falha de sistemas, equipamentos ou componentes e avaliar qualitativamente a criticidade de seus respectivos efeitos. A criticidade é obtida a partir da conjugação da probabilidade de ocorrência com a severidade da conseqüência de cada falha. A criticidade neste contexto pode ser interpretada aqui como risco.

É definida também por VASSILIOU (2000), como uma técnica analítica para identificar e analisar a influência (probabilidade) dos potenciais modos de falha de um produto (projeto, processo ou sistemas) ou serviço, cujos efeitos devam ser considerados, eliminados ou minimizados, por meio de uma avaliação de índices (probabilidade, conseqüência e detecção), que correspondem a um valor da criticidade na utilização do produto, na sua manutenção e segurança.

De um modo geral, essa técnica colabora com grande eficácia na implantação de estudos de análise de riscos e confiabilidade. O professor Marvin RAUSAND (2001), afirma que esta é a técnica de confiabilidade mais disseminada no mundo.

Nesta dissertação, aplicou-se a técnica FMECA conforme especificação técnica da Petrobras ET-3000.00-5400-983-PAK-001 (2004), para fornecer estimativas qualitativas para as freqüências de ocorrência dos modos de falha, bem como para o grau de severidade de seus efeitos, obtendo, com essa combinação, o risco de perda de alguma função

desempenhada pelos sistemas analisados que pudesse interagir comprometendo assim a estabilidade da unidade marítima de produção FPSO P-A.

Segundo esta técnica apresentada a seguir, os sistemas são analisados através de suas funções. A definição de função segundo a norma SAE JA 1012 (2002), é o que o proprietário ou usuário do ativo físico ou sistema quer que ele faça. Assim, identificam-se as funções de cada um dos sistemas que fazem parte do escopo da análise e quais são os principais componentes que, uma vez funcionando adequadamente, garantem o cumprimento destas funções.

Os principais resultados esperados com a aplicação desta análise qualitativa através da FMECA são:

- Identificação dos principais modos de falha de cada uma das funções dos sistemas analisados, os quais possam comprometer a restauração da condição de equilíbrio do FPSO em um cenário de emergência, com bandas ate de 10 graus.
- Uma avaliação dos efeitos imediatos e subseqüentes de cada um dos modos de falha das funções sobre o sistema ou demais sistemas afetados (interações);
- Verificação das possíveis ações para se minimizar os efeitos e impactos da ocorrência de falhas das funções dos sistemas;
- Estimativas qualitativas da frequência de ocorrência de cada modo de falha das funções e de seus efeitos;
- Recomendação de medidas destinadas a eliminar/reduzir os efeitos de cada modo de falha, ou que auxiliem na sua detecção.

Para a realização de uma FMECA conforme a ET-3000.00-5400-983-PAK-001 (2004) deve-se dispor de informações que permitam entender claramente o funcionamento do sistema, a função que cada componente desempenha no sistema e dados específicos de cada um dos componentes que permitam a verificação de todos os mecanismos pelo qual o componente possa falhar. Um dos fatores críticos para a análise de FMECA é a composição da equipe, visto que esta é uma técnica concebida para ser realizada por um grupo de especialistas. Esta deve ter, entre seus participantes, especialistas de várias disciplinas, como, por exemplo, elétrica, automação, embarcação, segurança, etc. O pessoal responsável pela operação/manutenção também deve participar das reuniões devido aos seus conhecimentos do ativo.

Além disso, a disponibilidade dos documentos referentes ao ativo a ser estudado é de fundamental importância para o estudo do sistema e suas interações.

Na fase inicial da análise, cada sistema é considerado como um módulo funcional, isto é, um grupo de componentes que atuam juntos de forma a executar uma ou mais funções. Para cada um dos sistemas, todas as funções por eles desempenhadas são listadas, assim como os componentes que garantem esta função.

De forma a definir as fronteiras de cada sistema, uma representação gráfica é adotada para cada módulo funcional, conforme ilustrado na Figura 2.1.

Nessa representação por diagrama de blocos (módulo funcional), os fluxos de entrada e saída horizontais denotam interações com os demais sistemas que integram o escopo da análise, enquanto que os fluxos verticais representam interações com outros sistemas da plataforma não pertinentes à análise em referência.

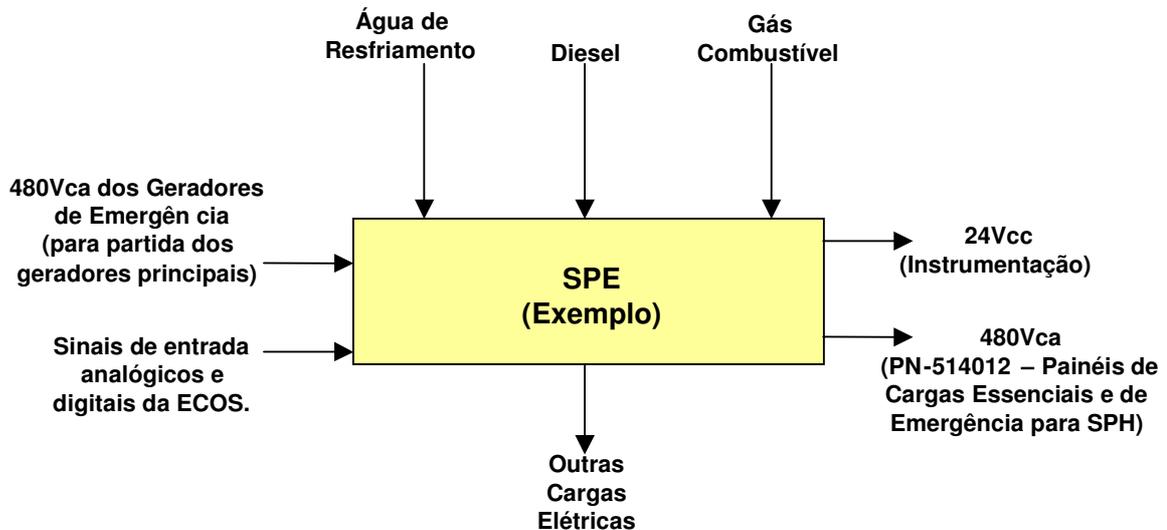


Figura 2.1 - Módulos Funcionais – Representação dos Sistemas através de Diagrama de Blocos.

A representação gráfica através dos módulos funcionais permite de uma forma simplificada, identificar as interações entre o sistema representado, SPE (Sistema de potência elétrica), e os demais sistemas que compõem o escopo da análise. Na Figura 2.1 identifica-se que o SPE é suprido com sinais analógicos e digitais oriundos do SAIS (Sistema de automação e intertravamento de segurança) e ao mesmo tempo podemos identificar que o sistema SPE também supre o sistema SAIS com a tensão de 24 Vcc. Os demais insumos (setas que entram na caixa) e produtos (setas que saem da caixa), representados na vertical e que não fazem parte do escopo da análise não são considerados.

Esta abordagem facilita também na identificação das funções de cada sistema analisado. Todos os produtos do sistema, representados pelas setas que saem da caixa, são considerados uma função deste sistema e o seu cumprimento depende da operação bem sucedida de um conjunto de componentes e tarefas que estão “dentro da caixa”, ou seja, que compõe o próprio sistema. Os insumos também são importantes, mas para evitar a duplicidade de análise, considera-se apenas os “produtos”, pois estes “insumos” são

oriundos de outros sistemas e, portanto são analisados como “produtos” quando estes sistemas estiverem sendo analisados.

Após a definição dos sistemas através da representação por diagrama de blocos, uma FMECA Funcional é aplicada a cada um dos sistemas. A Figura 2.2 sintetiza as várias etapas para o preenchimento da planilha da FMECA conforme ET-3000.00-5400-983-PAK-001 (2004).

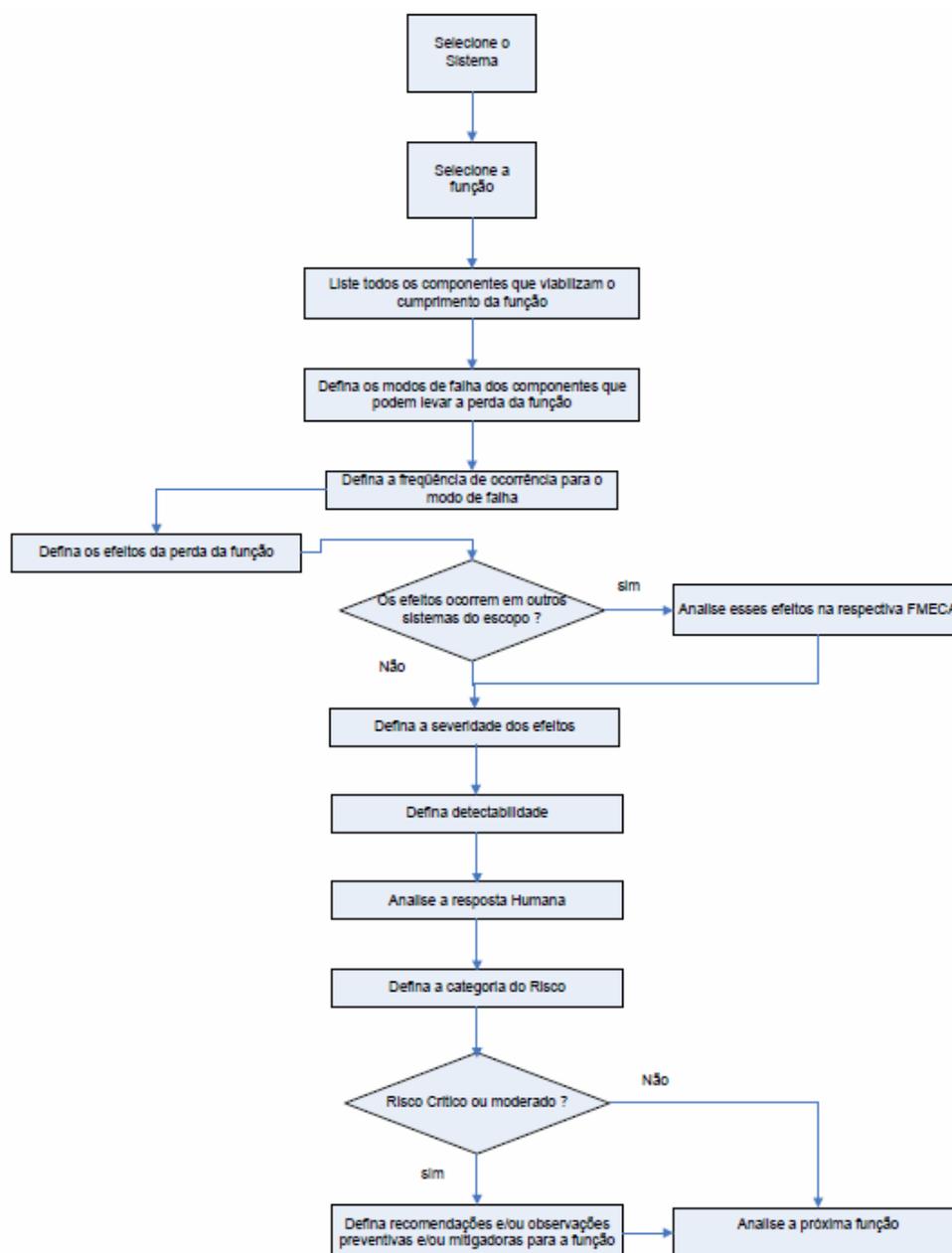


Figura 2.2 – Fluxograma das etapas de um FMECA Funcional.

O símbolo de decisão usado no fluxograma da Figura 2.2 acerca do risco ser crítico ou moderado contempla a análise de tolerabilidade assumido no estudo onde estes cenários críticos e moderados foram considerados não toleráveis. Para estes cenários, a definição de recomendações de ações preventivas e/ou mitigadoras era obrigatória.

As informações da FMECA são então registradas numa planilha, conforme ilustrado no Apêndice A – Modelo da planilha de FMECA e apresentadas a seguir.

As colunas de informações solicitadas nessa planilha são:

Função: Nessa coluna são listadas as funções de interesse de cada sistema. Baseados nas setas que saem dos módulos funcionais.

Componentes: Nessa coluna são listados os componentes que viabilizam o cumprimento da função. É o conjunto de componentes que garantem o “produto”.

Modo de Falha: Nessa coluna são listados os modos de falha dos componentes que podem levar à perda da função. O modo de falha é característica da falha, ou seja, como esta é percebida.

Frequência: Nessas colunas são registradas as categorias de frequência de ocorrência de falha considerada para cada função, conforme listado na Tabela 2.1, onde λ é a taxa de falha expressa em falhas por hora.

Tabela 2.1 – Categorias de frequência.

Categoria	Descrição	Falhas por Hora
A	Extremamente Remoto	$\lambda < 1,14E-6$
B	Remoto	$5,71E-6 < \lambda < 1,14E-6$
C	Provável	$1,14E-4 < \lambda < 5,71E-6$
D	Frequente	$\lambda > 1,14E-4$

A categoria escolhida para a frequência de ocorrência da falha funcional é relativa à taxa de falha do componente mais crítico responsável pela função.

Efeitos: Nessa coluna são registrados os efeitos da perda da função no sistema analisado ou em outros sistemas relacionados no escopo.

Quando um efeito foi registrado em outro sistema pertencente ao escopo de análise, tal efeito foi avaliado na FMECA do referido sistema.

Severidade: Essa coluna registra as categorias de severidade de cada efeito (consequência), conforme listado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Categorias de severidade dos efeitos.

Categoria	Descrição	Efeitos
I	Desprezível	Sem consequências relevantes para a segurança.
II	Moderada	Implicações em um sistema (SPE, SAIS, SLC ou SPH) em relação à segurança.
III	Crítica	Com consequências para a segurança em mais de um sistema (SPE, SAIS, SLC ou SPH).
IV	Catastrófica	Com consequências relevantes para a segurança em pelo menos três sistemas que integram o escopo da análise (SPE, SAIS, SLC ou SPH), ou iminência de abandono da plataforma (<i>Emergency Shutdown</i> nível 4)

Detectibilidade: Nesta coluna são registradas as formas e dispositivos utilizados pelos operadores para detectar o modo de falha ou a perda da função.

Resposta Humana: Nessa coluna são registradas considerações relativas às possíveis respostas humanas durante o acidente, considerando aspectos positivos e negativos, conforme descrito a seguir.

a) Na coluna “positiva – recuperação da falha” registram-se as formas como os operadores podem agir, usando os sistemas e recursos existentes, de forma a interromper a ocorrência do acidente ou prevenindo o seu agravamento. Com isso

será possível avaliar se os dispositivos e recursos existentes são adequados para viabilizar uma resposta positiva do operador.

b) Na coluna “negativa”, são avaliadas e registradas falhas humanas possíveis de ocorrer durante uma função de acidente e que contribuam para o escalonamento do evento.

Risco: Nessa coluna são registradas as categorias de risco atribuídas a cada função, com base nos valores de frequência e severidade, conforme apresentado na matriz de risco ilustrada na Figura 2.3.

Severidade

IV	RM	RC	RC	RC	Risco RC = Crítico RM = Moderado RNC = Não Crítico
III	RM	RM	RC	RC	
II	RNC	RM	RM	RC	
I	RNC	RNC	RNC	RM	
	A	B	C	D	Frequência.

Figura 2.3 – Matriz de risco.

Recomendações / Observações: Nessa coluna são registradas as recomendações de ações preventivas ou mitigadoras levantadas para a função analisada, assim como as observações que sejam pertinentes à mesma.

As recomendações são identificadas por “RX”, onde “X” corresponde à numeração única e seqüencial que identifica a recomendação no estudo.

As observações são identificadas por “OX”, onde “X” corresponde à numeração única e seqüencial que identifica a observação no estudo.

Cenário: Número da função, o qual deverá ser único e seqüencial.

2.3 Conceitos Básicos de Estatística e Confiabilidade

Quando os resultados possíveis de um experimento ou modelo são conhecidos, LAPPONI (2000), mas não é possível antecipar seus resultados, diz-se que é um experimento aleatório.

Segundo VASSILIOU (2000), a maioria dos problemas em engenharia da confiabilidade é referente à quantificação de medidas, tais como tempo até a falha de um item, ou se o item falhou ou não.

Ao analisar um item para verificar se o mesmo é defeituoso ou não, teremos somente duas possibilidades. Pode-se denotar a variável aleatória X com as possíveis saídas (defeituoso ou não defeituoso). Neste caso, X é uma variável aleatória que só pode assumir um destes valores.

Quando são usados os tempos até a falha, a variável aleatória X pode assumir o valor do tempo até a falha do item, variando de zero até infinito.

Se a variável aleatória pode assumir um valor discreto, por exemplo, se o item for defeituoso $X=1$ e se o item for não-defeituoso $X=0$. Então, pode-se dizer que X é uma variável aleatória discreta.

Quando um item puder falhar em qualquer tempo, $t > 0$, então X pode assumir qualquer valor entre zero e infinito. Neste caso a variável X é denominada de variável aleatória contínua.

Dos conceitos básicos da estatística, dados uma variável aleatória contínua X :

- A função densidade de probabilidade, pdf, é representada por $f(x)$.
- A função distribuição acumulada, cdf, é representada por $F(x)$.

Estas duas funções fornecem uma completa descrição da distribuição de probabilidade de uma variável aleatória.

Se X é uma variável aleatória contínua, então a função de densidade de probabilidade, pdf de X , é uma função $f(x)$, tal que para dois números a e b , com $a \leq b$, resulta:

$$P(a \leq b) = \int_a^b f(x) dx \quad (2.1)$$

Isto é, a probabilidade de X ter um valor no intervalo $[a, b]$ é a área da função densidade formada entre a e b conforme ilustrado na Figura 2.4.

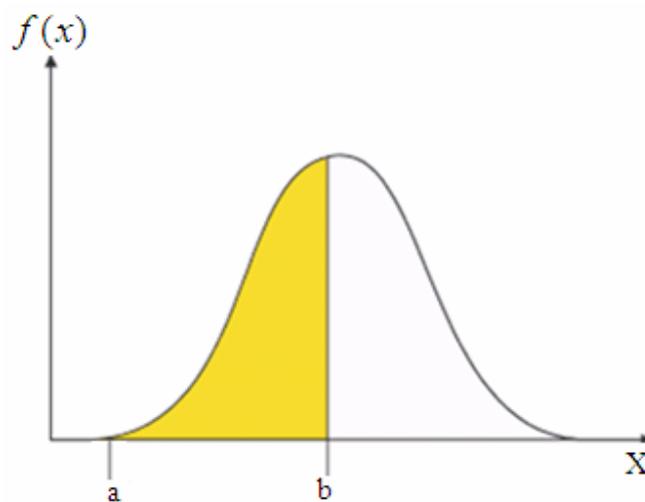


Figura 2.4 – Representação gráfica da função densidade de probabilidade, pdf.

A função distribuição acumulada, cdf, é uma função $F(x)$ de uma variável aleatória X , definida para um número x por:

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(s) ds \quad (2.2)$$

Isto é, para um número x , $F(x)$ é a probabilidade de que o valor observado de X será no máximo x . A função de distribuição acumulada é graficamente representada pela Figura 2.5.

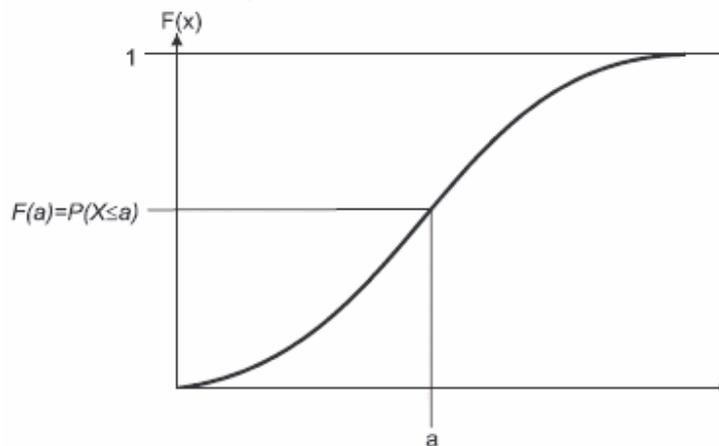


Figura 2.5 – Representação gráfica da função densidade acumulada, cdf.

A função acumulada é a área formada pela função densidade de probabilidade, até um valor de interesse x . Isto significa que a área total da pdf será sempre igual a 1, pois se trata da área total abaixo da curva.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (2.3)$$

Denotando por T a variável aleatória representativa dos tempos de falha de um componente, a probabilidade de que a falha ocorra entre t e $t+\Delta t$, onde $f(t)$ é denominada densidade de falha e Δt é suficientemente pequeno será dada por:

$$f(t)\Delta t = P(t < T < t + \Delta t) \quad (2.4)$$

Note-se que a densidade de falha é a função densidade de probabilidade.

A função confiabilidade poder ser obtida utilizando-se a definição da função distribuição acumulada. A probabilidade de um determinado evento ocorrer no tempo t , baseado na $f(t)$, será dada por:

$$F(t) = \int_{0,t} f(s) ds \quad (2.5)$$

A equação (2.4) fornece a probabilidade de falha do item no tempo t .

Do ponto de vista probabilístico, diz-se que o tempo de vida do item é representado por uma variável aleatória e sua confiabilidade é expressa como:

$$R(t) = P(T > t) \quad (2.6)$$

Ou seja, a confiabilidade é a probabilidade de que o item irá sobreviver ao intervalo de tempo t .

A probabilidade de um item não desempenhar com sucesso suas funções específicas, durante um período de tempo, dentro de condições normais de utilização e operação é determinado pela função de distribuição acumulada,

$$F(t) = P(T \leq t) \quad (2.7)$$

Para mostrar isso matematicamente, precisamos definir também a função inconfiabilidade, $F(t)$, a probabilidade de que a falha ocorra no intervalo entre 0 e t .

$$F(t) = \int_{0,t}^t f(s) ds \quad F(t) = \int_0^t f(s) ds$$

(2.8)

Que representa a probabilidade de que a falha ocorra até o tempo (instante) t . Dada a natureza probabilística, fica claro que $R(t) = 1 - F(t)$ e vice-versa e,

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(s) ds = \int_t^{\infty} f(s) ds$$

(2.9)

Destas propriedades, verifica-se que:

$$R(0) = 1 \text{ e } R(\infty) = 0 \text{ e } R(\infty) = 0$$

(2.10)

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

(2.11)

A engenharia da confiabilidade é formalmente definida por LAPPONI (2000), como a ciência que fornece ferramentas teóricas e práticas que permitem especificar, projetar, testar e demonstrar a probabilidade e a capacidade segundo a qual componentes, produtos e sistemas desempenharão suas funções, por períodos determinados de tempo, em ambientes específicos e sem apresentar falhas.

De acordo com O'CONNOR (2002), confiabilidade é a probabilidade de um item desempenhar suas funções, sob condições específicas num período de tempo.

Segundo a ABNT NBR-5462 (1994), é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida, sob condições especificadas durante um dado intervalo de tempo.

Desempenhar suas funções está associado à idéia de sucesso, ou seja, a definição de confiabilidade pode ainda ser complementada como a probabilidade de que um componente, equipamento ou sistema exercerá sua função sem falhas, por um período de tempo previsto, sob condições de operação especificadas.

2.4 Conceitos de falha

Calcula-se a confiabilidade de um item através do emprego do conceito de taxa de falha, representada genericamente por $\lambda(t)$. A interpretação intuitiva da taxa de falha é o número de falhas que um item sofre por unidade de tempo.

A interpretação probabilística da taxa de falha $\lambda(t)$ é dada por:

$$\lambda(t) \Delta t = P(T + \Delta t, T > t) = \frac{P\{(T > t) \cap (T < t + \Delta t)\}}{P(T > t)} = \frac{P\{(T > t) \cap (T < t + \Delta t)\}}{P(T > t)}$$

(2.12)

Onde a probabilidade no numerador é igual à equação 2.4 e o denominador é igual à equação 2.6, então:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad (2.13)$$

decorrendo daí:

$$f(t) = \lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(s)ds} \quad (2.14)$$

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(s)ds} \quad (2.15)$$

Outro conceito muito importante é o de tempo médio para falhar (denotado pela sigla MTTF, do inglês *Mean Time To Failure*). É a média dos tempos de falha calculada a partir da distribuição de probabilidade que os seus tempos de falha seguem.

Segundo VASSILIOU (2000) a medida do tempo médio de operação até a falha de um item, é dada pela função de vida média.

$$\bar{T} = m = \int_0^{\infty} t * f(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (2.16)$$

Voltando à taxa de falha, $\lambda(t)dt$ é a probabilidade de um item falhar no próximo intervalo de tempo $t + dt$, dado que o mesmo já sobreviveu até aquele instante t . Mais rigorosamente, a taxa de falha é entendida como a probabilidade condicional de um item falhar em um intervalo infinitesimal, dado que estava funcionando no início desse intervalo.

Segundo a norma Petrobras N-2784 (2005), a taxa de falha é a relação entre o número de falhas que ocorrem em um componente, equipamento ou sistema e o tempo de operação ou tempo “calendário” ou número total de demandas nos quais essas falhas ocorrem.

O comportamento genérico da taxa de falha de itens em relação ao tempo se assemelha muito a uma banheira, de modo que é tradicional denominar o gráfico de taxa de falhas em função do tempo de curva da banheira, conforme ilustrado na Figura 2.6.

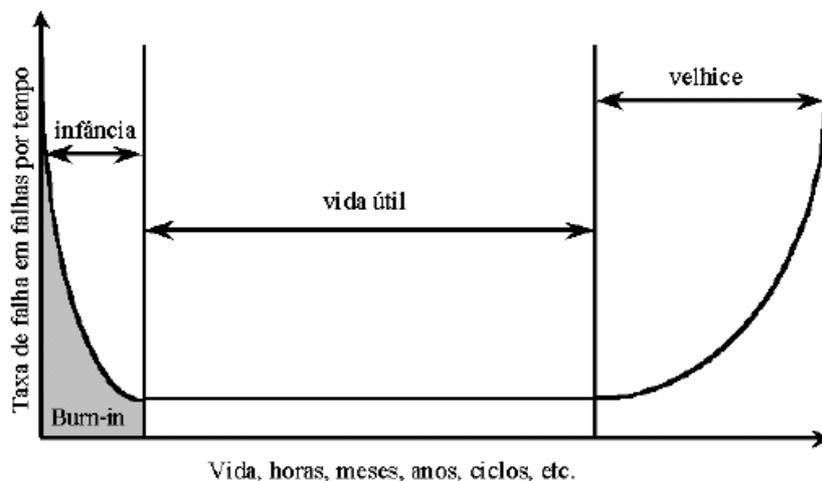


Figura 2.6 – Curva da banheira.

Podemos perceber no gráfico três diferentes comportamentos as regiões denominadas: I-infância, II - vida útil e III – velhice. A curva representa a evolução da taxa de falha ao longo da vida do componente.

Na região I observam-se altos valores das taxas de falha, mas há uma tendência de queda desses valores. Este período é denominado de mortalidade infantil. Representa a situação em que protótipos de componentes estão sendo testados e aprimorados à medida que falham.

A região II apresenta uma taxa de falha constante. Este período é conhecido como vida útil. Aqui os componentes já estão prontos para operação, sendo as suas falhas decorrentes de agentes externos. É comum falar-se em falhas aleatórias.

A região III apresenta taxas de falha que aumentam com o tempo. Este período é conhecido como envelhecimento. Aqui, fenômenos como corrosão, fadiga, abrasão, etc., fazem com que o componente sofra desgaste.

2.5 Distribuições Estatísticas

As distribuições estatísticas são descritas pelas funções densidade de probabilidade (pdf). Nos tópicos anteriores foram introduzidos os conceitos de funções de densidade para mostrar como todas as outras funções mais comumente utilizadas na engenharia da confiabilidade permitem a análise de dados de vida, tais como, confiabilidade, taxa de falha e função vida média. Todas essas podem ser determinadas diretamente a partir das definições da pdf ou $f(t)$.

Existem diferentes distribuições e cada uma delas tem a função densidade de probabilidade pré-definida. Estas distribuições foram formuladas para modelar matematicamente um determinado sistema e/ou estudar um determinado comportamento.

Por serem as distribuições um bom instrumento para analisar o comportamento de um item ao longo do tempo, estas são comumente chamadas de distribuições de vida.

2.5.1 Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial é a distribuição utilizada para modelar itens ou sistemas que apresentam uma taxa de falha constante, e sua densidade de falha, $f(t)$, é dada por:

$$f(t) = \lambda(t)e^{-\lambda t} \quad (2.17)$$

Onde t é a variável aleatória que representa o tempo e a letra grega λ representa o que é comumente referenciado como o parâmetro da distribuição, a taxa de falha. Os parâmetros da distribuição descrevem e definem uma distribuição particular.

Graficamente a função densidade de probabilidade exponencial $f(t)$ é apresentada conforme a Figura 2.7.

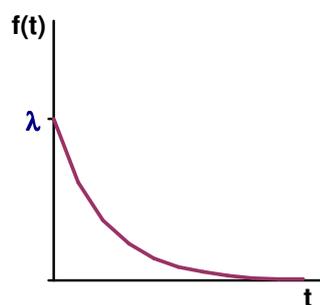


Figura 2.7 – Gráfico $f(t)$ – distribuição exponencial.

A função confiabilidade é definida pela equação 2.18 e apresentada graficamente na Figura 2.8.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.18)$$

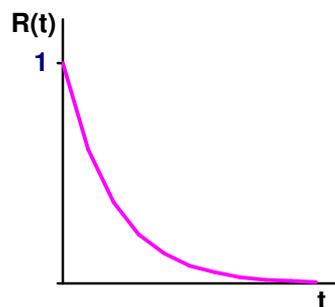


Figura 2.8 – Gráfica $R(t)$ – distribuição exponencial.

A probabilidade do item não sobreviver a um intervalo de duração t , denominado de inconfiabilidade é dada por:

$$F(T) = 1 - R(T) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.19)$$

E a função taxa de falha, por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda \quad (2.20)$$

Onde a taxa de falha é constante e representada por $\lambda(t) = \lambda$, conforme ilustra a Figura 2.9.

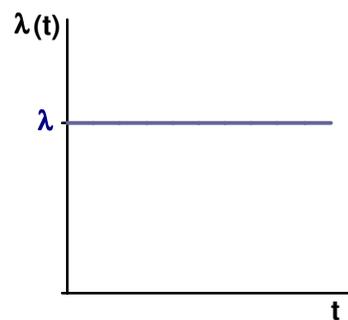


Figura 2.9 – Gráfico $\lambda(t)$ – distribuição exponencial.

A vida média da distribuição exponencial será dada por:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (2.21)$$

Um estudo da *United Airlines* (UAL) publicado por F.S. Nowlan e H.F. Heap (1978) após pesquisa em histórico de 30 anos de manutenção na aviação civil, identificou seis diferentes padrões de comportamento das taxas de falha para os componentes que compunham a aeronave, ao longo do tempo conforme Figura 2.10.

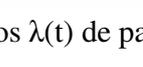
Padrão de falha	Aviação
Padrão A 	4%
Padrão B 	2%
Padrão C 	5%
Padrão D 	7%
Padrão E 	14%
Padrão F 	68%

Figura 2.10 – Gráficos $\lambda(t)$ de padrões de falhas.

Analisando os resultados da pesquisa percebemos que cerca de 90% dos itens avaliados (padrões D, E F) não envelhecem, ou seja, têm suas falhas predominantemente durante a vida útil onde assumem comportamento aleatório e, portanto, podem ser modelados por uma distribuição exponencial.

2.5.2 Distribuição do chi quadrado (χ^2)

É a distribuição usada para o cálculo de intervalos de confiança de itens cujos tempos de falha sejam exponencialmente distribuídos.

A função densidade acumulada da distribuição χ^2 trata-se na verdade de um conjunto de distribuições que possuem formas que variam bastante conforme ilustrado na Figura 2.11. Cada distribuição é definida pelo seu número de graus de liberdade.

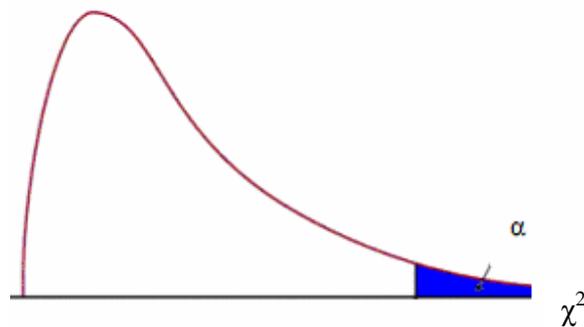


Figura 2.11 – Gráfico da função densidade acumulada qui quadrado

Os valores para a função densidade acumulada da χ^2 em função do número de graus de liberdade estão disponíveis em tabelas em O'CONNOR (2002).

2.6 Limites de Confiança

Uma maneira de calcularmos uma estimativa para um parâmetro desconhecido é a aplicação dos limites ou intervalos de confiança. A idéia é construir a partir de amostras um intervalo de confiança para o parâmetro de interesse com uma probabilidade de $1-\alpha$ (nível de confiança) de que o intervalo irá conter seu valor verdadeiro se repetirmos a amostragem várias vezes.

Representa-se por α o nível de significância, isto é, o erro que cometemos ao afirmarmos que, por exemplo, 90% das vezes o intervalo $l \leq \theta \leq L$, contém o valor verdadeiro de θ . Onde l é o limite inferior do intervalo, θ o parâmetro desconhecido e L o limite superior do intervalo, então o comprimento $L - l$ constitui o intervalo de confiança.

De acordo com BROOME (1990), o cálculo dos limites de confiança para distribuições exponenciais pode ser calculado através das equações 2.22 e 2.23.

$$\frac{2T}{\chi^2_{\alpha/2, 2r+2}} \leq \theta \leq \frac{2T}{\chi^2_{1-\alpha/2, 2r}} \quad (2.22)$$

Onde:

θ – MTTF – Tempo médio para falhar.

T – tempo total do teste.

χ^2 - Distribuição chi quadrado.

α – Nível de Significância.

r – Número de falhas ocorridas no teste.

Quando durante a simulação não ocorrerem falhas, deve-se usar a equação 2.23

$$\frac{2T}{\chi^2_{\alpha,2}} \leq \theta \quad (2.23)$$

2.7 Modelagem por Árvores de Falha

Segundo a norma Petrobras N-2784 (2005), chama-se de análise por árvore de falhas a técnica dedutiva estruturada que representa graficamente a associação de portões lógicos para identificar possíveis combinações de eventos que levam a um evento principal indesejado, denominado evento topo, permitindo quantificar a frequência ou a probabilidade de ocorrência desses eventos.

Pode ser tanto uma análise qualitativa quanto quantitativa. Na análise qualitativa, o objetivo pode ser determinar as causas básicas de um evento ou a seqüência que levou ao mesmo.

Nas análises quantitativas, o objetivo é determinar a probabilidade de ocorrência do evento topo. Neste trabalho, esta técnica foi utilizada para estimar a probabilidade de perda das funções críticas e moderadas associadas aos sistemas analisados que pudessem

comprometer a estabilidade da plataforma, ou seja, a sua inconfiabilidade $F(t)$. Inconfiabilidade é a probabilidade de um sistema, subsistema ou componente não desempenhar com sucesso suas funções específicas, durante um período de tempo, dentro de condições normais de utilização e operação.

E a partir do cálculo da probabilidade de falha, estimar a confiabilidade dos sistemas modelados para um determinado tempo de missão. Para isso, utilizaram-se os parâmetros de confiabilidade dos eventos básicos, os tempos médios até a falha, como dados de entrada do modelo.

Os principais benefícios da aplicação da técnica de análise por árvore de falhas (FTA) são:

- Cálculo da confiabilidade e da inconfiabilidade de um sistema.
- Identificação de modos de falha e funções singulares.
- Identificação da interação de eventos;
- Pode ser usada para diferentes níveis de complexidade;
- Complementa as análises de FMECA;
- Permite a determinação de inter-relações de eventos através de portões lógicos;
- Permite determinar os eventos críticos;
- Pode considerar falhas de causa comum;
- Indica claramente os pontos fracos do sistema analisado.

2.7.1 Simbologia utilizada

Na construção dos modelos por árvores de falhas, os eventos que interagem e compõem a árvore são representados por símbolos.

Evento Topo: Evento indesejado o qual se quer calcular a probabilidade de ocorrência. Representado graficamente conforme a Figura 2.12.

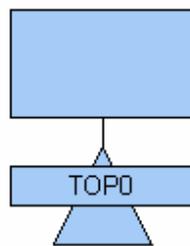


Figura 2.12 – Representação gráfica do evento topo.

Evento intermediário de falha: Usado para descrever um evento intermediário ou modo de falha. Representado graficamente conforme a Figura 2.13.

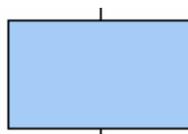


Figura 2.13– Representação gráfica do evento falha.

Evento Primário: Usado para descrever um evento básico e independente. Representado graficamente conforme a Figura 2.14.



Figura 2.14 – Representação gráfica do evento primário.

Portão lógico “OU”: Representa graficamente a união de dois eventos, isto é, o evento de saída só acontece se uma ou mais entradas ocorrerem. Representado graficamente conforme a Figura 2.15.

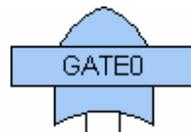


Figura 2.15 – Representação gráfica do portão “OU”.

Portão lógico “E”: Representa graficamente a união de dois eventos, isto é, o evento de saída só acontece se todas as entradas ocorrerem. Representado graficamente conforme a Figura 2.16.

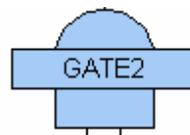


Figura 2.16 – Representação gráfica do portão “E”.

Portão de transferência: Indica graficamente que os eventos subseqüentes foram desenvolvidos em outra página do estudo. Representado graficamente conforme a Figura 2.17.

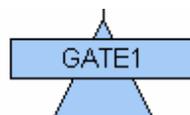


Figura 2.17 – Representação gráfica da transferência.

2.7.2 Cálculos da FTA – Abordagem Quantitativa

A seguir são descritas as principais fórmulas e os métodos utilizados para calcular os parâmetros quantitativos da árvore de falhas. Foi utilizado o aplicativo AvSim + versão 10 da Isograph, para avaliação dos eventos.

Denomina-se corte de uma árvore de falhas o conjunto de eventos básicos cuja ocorrência garante o evento topo (indesejável).

Chama-se de corte mínimo a menor combinação de eventos básicos a qual, se todos ocorrerem, levará à ocorrência do evento topo.

As árvores de falhas foram desenvolvidas utilizando-se portões lógicos dos tipos “ou” e “e” cujos cálculos são apresentados a seguir.

A probabilidade de falha num portão “OU” é calculada conforme equação 2.24.

$$F_{OU} = 1 - \prod_{j=1}^k (1 - F_j) \quad (2.24)$$

Onde F_{OU} – Probabilidade de falha na saída da porta “OU”.

F_j – Probabilidade de falha do evento de entrada j .

A probabilidade de falha num portão “E” é calculada conforme equação 2.25.

$$F_E = \prod_{j=1}^k (F_j) \quad (2.25)$$

Onde F_E – Probabilidade de falha na saída da porta “E”.

F_j – Probabilidade de falha do evento de entrada j .

O tempo médio para falhar do sistema é calculado através da equação 2.26

$$MTTF_{sys} = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.26)$$

Onde o $MTTF_{sys}$ = tempo médio para a primeira falha do sistema.

O número de falhas esperadas para o sistema durante o tempo de simulação W_{SYS} é dado pela equação 2.27

$$W_{sys} = r = \int_0^T F_{sis}(t) dt \quad (2.27)$$

Onde $F_{sis}(t)$ é a frequência de falha do sistema, resultado da associação de F_E e F_{OU} conforme 2.24 e 2.25.

3 APLICAÇÃO DA ANÁLISE QUALITATIVA DE RISCO - FMECA

A análise qualitativa de riscos por FMECA teve como objetivo fundamental, estudar os impactos sobre a segurança da unidade FPSO P-A quanto à recuperação da sua condição de equilíbrio em um cenário de emergência, considerando-se também falhas oriundas dos sistemas de potência elétrica (SPE), automação e intertravamento de segurança (SAIS), lastro e carregamento (SLC) e de potência hidráulica (SPH) e de suas interações que pudessem se propagar e afetar adversamente os demais sistemas, comprometendo a resposta segura dos sistemas de segurança ou dos operadores, aumentando, assim, o risco de ocorrência de um acidente grave na unidade .

A análise de riscos por FMECA da unidade marítima de produção FPSO P-A foi realizada com base nos documentos fornecidos pela Petrobrás, tais como desenhos unifilares, fluxogramas de processo, manuais de operação, etc., e complementadas por meio de entrevistas com especialistas e profissionais das áreas técnicas e engenharia da Petrobras.

O preenchimento das planilhas da FMECA, cujo modelo é ilustrado pelo apêndice A, foi realizado seguindo-se a metodologia descrita no Capítulo 2 onde buscou-se:

- a) identificar as funções de cada um dos quatro sistemas (SPE, SAIS, SLC e SPH);
- b) identificar os componentes envolvidos no cumprimento dessas funções;
- c) identificar os possíveis modos de falha e os efeitos da perda de cada uma das funções para o sistema em questão, bem como para os outros sistemas em análise e a segurança da unidade.
- d) Cada falha funcional identificada foi classificada quanto à sua frequência estimada de ocorrência e à severidade potencial de seus efeitos para a segurança.

e) Uma matriz de risco resultante desta classificação contemplou de modo qualitativo a criticidade de cada função.

f) Durante a realização do estudo de FMECA, foram levantadas recomendações e observações que refletem os pontos mais relevantes identificados e que fundamentaram a modelagem por árvore de falhas.

As análises foram realizadas por um time de especialistas da própria plataforma, além de engenheiros do suporte da Petrobras e da consultoria. O time foi composto pelos seguintes profissionais:

- 3 Engenheiros de Equipamentos – Operação P-A.
- 1 Engenheiro Consultor – Suporte Técnico /SPO.
- 1 Engenheiro de Segurança – ISUP.
- 7 Engenheiros da Consultoria cobrindo as disciplinas de engenharia da confiabilidade, mecânica, elétrica e automação, naval e processos.
- 3 Técnicos de manutenção elétrica/instrumentação - Operação P-A.
- 3 Operadores de facilidades/embarca - Operação P-A.

3.1 Escopo

Esta análise se aplica aos seguintes sistemas da Unidade FPSO P-A:

1 – SPE – Sistema de potência elétrica

2 – SAIS – Sistema de automação e intertravamento de segurança

3 – SLC – Sistema de lastro e carregamento

4 – SPH – Sistema de potência hidráulica

3.2 Premissas do estudo

Para a realização do estudo foram adotadas as seguintes premissas:

- Os cenários com riscos críticos ou moderados, pelo critério de tolerabilidade estabelecido na ET-3000.00-5400-983-PAK-001 (2004), foram considerados inaceitáveis. Para estes cenários foram desenvolvidas recomendações com o objetivo de reduzir e/ou mitigar estes riscos. Os cenários cujo risco foi caracterizado como não-crítico, segundo o mesmo critério, foram considerados toleráveis;
- Todos os sistemas da unidade marítima de produção que não faziam parte do escopo da análise foram considerados funcionando perfeitamente (suas falhas não foram analisadas);
- O cumprimento da legislação aplicável, incluindo regras de classificação, foi considerado atendido;
- O estudo considerou como condição mínima de operação para a garantia da reversão de anormalidade no controle do equilíbrio, a geração a partir de pelo menos um turbogerador, com banda máxima de 10°.
- Não foi considerada a possibilidade de falha do disjuntor de interligação para a perda da função.

3.3 Sistema de Potência Elétrica (SPE)

3.3.1 Descrição do sistema SPE

O sistema de potência elétrica que supre a plataforma incluiu a geração principal e a de emergência, os sistemas de distribuição em corrente contínua e corrente alternada e a fonte transitória de energia elétrica, composta por baterias de acumuladores e equipamentos de UPS.

O sistema de potência elétrica tem como objetivo alimentar eletricamente as cargas da unidade segundo as seguintes definições:

- a) Cargas essenciais – São as cargas definidas como “serviços essenciais para segurança” na *I-ET-Maritime production installation safety philosophy* (2006) , e definidas como cargas de emergência pelo IMO MODU CODE (2001) e pelas regras das Sociedades Classificadoras. As cargas essenciais devem permanecer energizadas pelo sistema de geração de emergência após a atuação do nível de shutdown ESD3-T e/ou após falha do sistema de geração principal.
- b) Cargas de emergência – São as cargas definidas como “serviços de emergência” na *I-ET-Maritime Production Installation Safety Philosophy* (2006) devem permanecer energizadas pela fonte transitória de energia elétrica (baterias), após falha do sistema de geração de emergência.
- c) Cargas normais – São as alimentadas somente a partir do sistema de geração principal, não sendo classificadas como cargas essenciais ou de emergência, devendo permanecer desenergizadas no caso de nível 3T de desligamento (desligamento ESD 3-T).

A representação do sistema de potência elétrica por módulos funcionais é apresentada pela Figura 3.1.

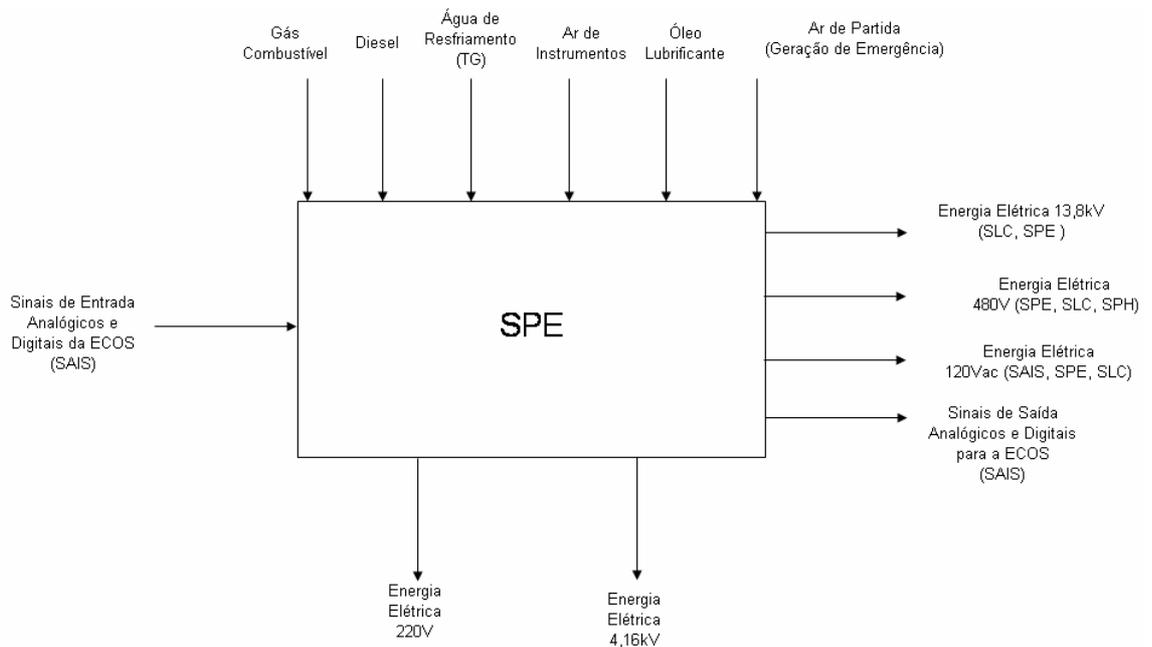


Figura 3.1 - Diagrama de blocos SPE.

Através da análise do módulo funcional do sistema de potência elétrica ilustrado pela Figura 3.1, pode-se identificar as interações deste sistema com os demais sistemas que compõem o escopo da análise (SAIS, SLC e SPH). O SPE é responsável pelo suprimento de energia elétrica na tensão de 13,8 kV para os sistemas SPE, SAIS E SLC, pelo suprimento de energia elétrica na tensão de 480 v para os sistemas SPE, SAIS, SLC e SPH, pelo suprimento de energia elétrica em 120 Vac para o SAIS e pelo envio e recebimento de sinais analógicos e digitais para o sistema supervisorio (SAIS).

3.3.1.1 Fontes de Suprimento de Energia Elétrica

O SPE é composto de três fontes de energia elétrica:

1. Geração principal;
2. Geração de emergência;

3. Sistema UPS.

O sistema normal de suprimento de energia elétrica para todas as plataformas é feito pelo sistema de geração principal, composto de quatro turbogeradores acionados a gás ou diesel, com potência nominal de 28,75MVA cada um. Em condições normais, 3 (três) turbogeradores operam simultaneamente suprimindo capacidade suficiente para todas as plataformas, permanecendo o quarto turbogerador na condição “reserva”. O sistema de partida das turbinas é hidráulico, através de unidades alimentadas a partir do painel de cargas essenciais.

O sistema de geração de emergência é composto de dois motogeradores acionados a diesel, com potência nominal de 2125kVA cada um. Na falha do sistema de geração principal, o sistema de geração de emergência é acionado objetivando atender ao painel PN-514012 – *Essential Switchboard*. O painel PN-514009 – *Ship Service Switchboard* pode ser suprido também pelo sistema de geração de emergência, utilizando os ramais *back feed connection*. Cabe salientar que a alimentação de cargas não emergenciais através da geração de emergência é permitida apenas em caráter excepcional e por curtos períodos, conforme SOLAS (2002).

As cargas de emergência energizadas mesmo no caso de falha do sistema de geração de emergência são supridas pelo sistema UPS, fonte transitória de energia elétrica (baterias).

O sistema de potência elétrica da plataforma é dotado dos seguintes sistemas UPS e de corrente contínua:

CB-810002A e CB-810002B – alimentados em 480V, suprem 120Vdc para as cargas do sistema de controle (SAIS) dos módulos e da embarcação.

CB-810003A e CB-810003B – alimentados em 480V, suprem 220Vdc para as cargas de iluminação de emergência dos módulos e da embarcação.

CB-810004A e CB-810004B – alimentados em 480V, também suprem 120Vdc para as cargas do sistema de controle (SAIS) dos módulos e da embarcação.

3.3.1.2 Sistemas de distribuição

A distribuição elétrica para a plataforma, em condições normais, é feita a partir do painel PN-514001 – *Main Switchboard*, em 13,8kV, através do seu barramento principal, dividido em duas seções conectadas por disjuntor de interligação, normalmente fechado e com dois turbogeradores ligados a cada uma das seções através de disjuntor específico.

Diretamente a partir do painel PN-514001 – *Main Switchboard* se originam seis ramais em 13,8kV para suprir diretamente três compressores de gás (9,305MVA cada) e três transformadores 13,8/0,69kV dedicados a cada bomba de carga (2,74MVA cada).

A partir de cada uma das duas seções do barramento principal do painel PN-514001 – *Main Switchboard* se originam, de forma radial, ramais que suprem os transformadores que atendem aos diferentes painéis de distribuição de forma redundante, ou seja, cada painel é atendido por dois conjuntos transformador/ramal.

Painel PN-514002 – 4,16kV *Switchboard*, dotado de barramento principal em duas seções conectadas por disjuntor de interligação normalmente aberto, cada seção alimentada a partir do PN-514001 – *Main Switchboard* por um conjunto transformador TF-514201A/B 13,8/4,16kV 6,3MVA e ramal, de forma redundante, ou seja, cada conjunto tem capacidade para atender todas as cargas do painel com o disjuntor de interligação (alimentação em

“L”). Este painel supre compressores e bombas com tensão de 4,16kV, cuja operação não será considerada no escopo da presente análise.

A partir do painel PN-514001 – *Main Switchboard* se originam oito ramais em 13,8kV para suprir, aos pares, os transformadores 13,8/0,48kV que alimentam, com redundância, os painéis:

- TF-514202A/B 2,0MVA PN-514003 – *Production Switchboard*;
- TF-514203A/B 1,6MVA PN-514006 – *Utilities Switchboard*;
- TF-514204A/B 1,6MVA PN-514009 – *Ship Service Switchboard*;
- TF-514205A/B 2,0MVA PN-514012 – *Essential Switchboard*.

Cada um dos quatro painéis acima é composto de barramento principal em 480V, em duas seções conectadas por disjuntor de interligação normalmente aberto, cada seção é alimentada de forma independente a partir do PN-514001 – *Main Switchboard* através de dois ramais com transformador 13,8/0,48kV. Em operação normal, as duas seções do barramento principal são alimentadas pelos seus respectivos transformadores, com o disjuntor de interligação aberto. No caso de falha de uma das alimentações, cada um dos transformadores possui capacidade de suprir o barramento completo com o disjuntor de interligação fechado (alimentação em “L”).

A seguir, a descrição das cargas supridas por cada painel, em relação ao escopo da presente análise.

PN-514003 – *Production Switchboard*

O painel alimenta compressores, bombas e centros de controle de motores (MCC) dedicados ao processo de produção da plataforma, não abordados no escopo deste trabalho. Este painel não tem possibilidade de alimentação a partir da geração de emergência.

PN-514006 – *Utilities Switchboard*

O painel alimenta painéis secundários de utilidades, bombas de resfriamento, guindastes e demais equipamentos auxiliares. Foram considerados no escopo da presente análise os painéis das bombas de lastro PN-M-UH-533501A/B/C e os painéis PN-514007 e PN-514008 – controle e refrigeração do VSD das bombas de carga. Este painel não tem possibilidade de alimentação a partir da geração de emergência.

PN-514009 – *Ship Service Switchboard*

O painel alimenta bombas de circulação de água, unidades hidráulicas para guinchos, unidades de descarga (off-load), compressores de ar de instrumentos, o painel PN-514010, que alimenta serviços auxiliares e bombas de diesel, e o painel PN-514011 que alimenta serviços auxiliares e bombas de sistemas hidráulicos relacionados com as bombas de lastro. O PN-514009 pode ser alimentado a partir da geração de emergência, utilizando-se um dos dois ramais back-feed connection.

PN-514012 – *Essential Switchboard*

O painel de cargas essenciais pode ser alimentado a partir da geração principal ou, na sua falha, a partir da geração de emergência.

Cargas atendidas pelo painel:

- PN-514009 – *Ship Service Switchboard*, quando o PN-514012 estiver em operação suprido pela geração de emergência, utilizando pelo menos um dos ramais *back-feed connection*;
- MCC auxiliares dos turbogeradores;
- UPS CB-810002A/B e CB-810004A/B (suprem o sistema ECOS);
- Unidades Hidráulicas de partida dos turbogeradores;
- Painel PN-514013 e PN-514014 (alimentam as bombas de potência hidráulica para as válvulas da embarcação);
- Painéis de produção, compressores de ar, bombas e demais dispositivos não incluídos no escopo desta análise.

Sistema formado pelas UPS CB-810002A/B e CB-810004A/B, supre o sistema ECOS.

3.3.2 Resultados da FMECA para o sistema SPE

O sistema foi analisado por meio da identificação de suas funções. A Tabela 3.1 ilustra as funções que foram determinadas para o SPE da plataforma P-A.

Tabela 3.1 – Lista de funções determinadas (SPE P-A).

Item	Descrição da função	Risco
1	Suprir com 13,8kV o PN-514001 – <i>Main Switchboard</i> , com pelo menos 1 gerador principal capacidade mínima de 23MW a partir dos Geradores Principais (SLC, SPE).	Não crítico

Item	Descrição da função	Risco
2	Fornecer energia elétrica para pelo menos uma das bombas de carga (MB-122301A, B ou C) (SLC).	Moderado
3	Suprir 480 V para o PN-514006 – <i>Utilities Switchboard</i> – a partir do PN-514001, com pelo menos 1 alimentador (SPE, SPH, SLC).	Moderado
4	Suprir 480 V para pelo menos um dos painéis PN-M-UH-533501A,B e C (HPU para <i>ballast pumps</i>) a partir do PN-514006 (SPH, SLC).	Não crítico
5	Suprir 480 V para o PN-514012 – <i>Essential Switchboard</i> , a partir do PN-514001 com pelo menos 1 alimentador (SPE, SPH, SLC,).	Moderado
6	Suprir 480 V para o PN-514012 – <i>Essential Switchboard</i> , a partir da geração de emergência com pelo menos uma unidade em operação e autonomia de 18 horas (SPE, SPH, SLC).	Crítico
7	Suprir 480 V para o PN-514009 a partir do PN-514012 (a partir da Geração de Emergência com duas unidades e pelo menos um <i>back feed</i> + disjuntor de interligação).	Não crítico
8	Suprir 480 V para o PN-514010 a partir do PN-514009 (a partir da Geração de Emergência com duas unidades e pelo menos um <i>back feed connection</i> + disjuntor de interligação).	Não crítico
9	Suprir 480 V para a bomba de diesel M-B-513301 a partir do PN-514010.	Não crítico
10	Suprir 480 V para o CB-810004A/B 120VAC UPS a partir do PN-514012 (SLC).	Não crítico
11	Suprir 480 V para o CB-810002A/B 120VAC UPS a partir do PN-514012 (SPE).	Crítico
12	Suprir 480 V para o PN-GE-514001A-03 <i>Main Generator Auxiliary MCC</i> a partir do PN-514012 (SPE).	Não crítico
13	Suprir 480 V para o PN-GE-514001B-03 <i>Main Generator Auxiliary MCC</i> a partir do PN-514012 (SPE).	Não crítico
14	Suprir 480 V para o PN-GE-514001C-03 <i>Main Generator Auxiliary MCC</i> a partir do PN-514012 (SPE).	Não crítico
15	Suprir 480 V para o PN-GE-514001D-03 <i>Main Generator Auxiliary MCC</i> a partir do PN-514012 (SPE).	Não crítico
16	Suprir 480 V para o PN-514013 <i>Accommodation Essential 480 V MCC</i> a partir do PN-514012 (SPH).	Moderado
17	Suprir 480 V para o MB-UH-553501A (bomba principal – HPU Navio) a partir do PN-514013 (SPH).	Moderado
18	Suprir 480 V para o MB-UH-553502 (bomba de recirculação – HPU Navio) a partir do PN-514013 (SPH).	Moderado
19	Suprir 480 V para o PN-514014 <i>Accommodation Essential 480 V MCC</i> a partir do PN-514012 (SPH,).	Moderado
20	Suprir 480 V para o MB-UH-553501B (bomba principal – HPU Navio) a partir do PN-514014 (SPH,).	Moderado
21	Suprir 480 V para o M-B-UH-GE-514001A-C <i>Gen. turbine hydraulic unit start motor</i> 480 V a partir do PN-514012 (SPE).	Não crítico
22	Suprir 480V para o M-B-UH-GE-514001A-B <i>Gen. turbine hydraulic unit start motor</i> 480V a partir do PN-514012 (SPE).	Não crítico

Item	Descrição da função	Risco
23	Suprir 480 V para o M-B-UH-GE-514001A-A Gen. <i>turbine hydraulic unit start motor</i> 480V a partir do PN-514012 (SPE).	Não crítico
24	Suprir 480 V para o M-B-UH-GE-514001B-A Gen. <i>turbine hydraulic unit start motor</i> 480 V a partir do PN-514012 (SPE).	Não crítico
25	Suprir 480V para o M-B-UH-GE-514001B-B Gen. <i>turbine hydraulic unit start motor</i> 480 V a partir do PN-514012 (SPE).	Não crítico
26	Suprir 480 V para o M-B-UH-GE-514001B-C Gen. <i>turbine hydraulic unit start motor</i> 480V a partir do PN-514012 (SPE).	Não crítico
27	Suprir 480 V para o M-B-542503 bomba de emergência/serviços gerais a partir do PN-514012 (SPE).	Não crítico
28	Suprir 480 V para o M-B-511103 bomba lift de emergência a partir do PN-514012 (SPE).	Moderado
29	Suprir 120VCA para o sistema SAIS a partir da UPS 2 (CB/BT-810002A/B e SAIS) com pelo menos um banco de baterias de cada uma delas. (SPE, SLC).	Crítico
30	Suprir 120VCA para o sistema SAIS a partir da UPS 4 (CB/BT-810004 A/B – SAIS) com pelo menos um banco de baterias de cada uma delas.(SPE,SLC).	Crítico
31	Suprir 120VCA para o sistema SPE a partir de ambas UPS (CB/BT-810002A/B e CB/BT-810004A/B – SPE) com pelo menos um banco de baterias de cada uma delas.	Crítico

Após o preenchimento das planilhas de FMECA, a tarefa seguinte foi levantar a quantidade de funções identificadas por categoria de frequência, de severidade e de criticidade. Tais resultados para o sistema de potência elétrica da plataforma FPSO P-A são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Estatística da FMECA (SPE).

Risco	Funções	Percentual
Crítico	5	16%
Moderado	9	29%
Não crítico	17	55%
Total	31	100 %

Devido ao escopo da análise, onde foram estudadas as interações entre os sistemas de potência elétrica e de automação e a estabilidade da plataforma FPSO P-A, o sistema de potência elétrica foi o sistema com mais funções identificadas como relevantes, 31 ao todo.

Em termos de criticidade (risco), os resultados da classificação das funções do SPE da plataforma P-A podem ser identificados pela matriz de riscos representada pela Figura 3.2.

SEVERIDADE					
Catastrófica	IV	2	1	4	0
Crítica	III	2	0	0	0
Moderada	II	1	0	5	0
Desprezível	I	6	1	9	0
		A	B	C	D
		Extremamente Remota	Remota	Provável	Frequente
		FREQÜÊNCIA			

Figura 3.2 – Matriz de riscos por função. SPE, plataforma P-A.

Com relação ao nível de criticidade, 5 (cinco) funções (16%) apresentaram a categoria de risco crítico, 9 (nove) funções (29%) apresentaram a categoria de risco moderado e 17 (dezesete) funções (55%) apresentaram a categoria de risco não crítico.

O risco foi considerado intolerável (crítico ou moderado) para 45 % das 31 (trinta e uma) funções identificadas. Para mitigar este risco, entre recomendações e observações, foram elaboradas 43 (quarenta e três) ações. Estas ações foram agrupadas conforme sua prioridade e são apresentadas pela Tabela 3.3 de funções críticas e pela Tabela 3.4 de funções moderadas.

Tabela 3.3 – Lista de ações por função crítica – SPE.

Função	Descrição da função	Risco
6	Suprir 480 V para o PN-514012 – <i>Essential Switchboard</i> , a partir da geração de emergência com pelo menos uma unidade em operação e autonomia de 18 horas (SPE, SPH, SLC).	Crítico
Ação	Descrição da recomendação	
R10	Estudar lógicas de intertravamento da partida do segundo gerador de emergência, visando o acionamento automático da segunda unidade, no caso da perda da primeira quando em operação.	
R11	Treinar equipe de bordo (operação/ manutenção) no pacote de geração de emergência.	
R12	Fornecer documentação atualizada de todo o pacote de geração de emergência (incluindo intertravamento dos painéis, disjuntores e demais equipamentos associados) para a plataforma.	
R13	Substituição do sistema de acionamento dos contatos para que tenhamos maior confiabilidade no seu acionamento.	
R14	Disponibilizar os recursos necessários para a conexão com o rebocador (cabo pra 480 V, caixa, etc.), de forma a garantir o suprimento externo de 480 V para o PN-5140012.	
R15	Elaborar um procedimento documentado descrevendo a rotina de conexão entre a P-A e o Rebocador, de forma a garantir o suprimento externo de 480 V para o PN-5140012.	
R16	Treinar as equipes envolvidas na operação de conexão entre a P-A e o rebocador, de forma a garantir o suprimento externo de 480 V para o PN-5140012.	
Função	Descrição da função	Risco
11	Suprir 480 V para o CB-810002A/B 120VAC UPS a partir do PN-514012 (SPE).	Crítico
Ação	Descrição da recomendação	
R19	Avaliar possibilidade de implementação de um ramal de 480 V do PN-514012 direto para o ramal alternativo do CB-810002A/B.	
O7	Foi identificada uma oportunidade de melhoria na alimentação do ramal alternativo devido à perda de sinal de referência.	
Função	Descrição da função	Risco
29	Suprir 120VCA para o sistema SAIS a partir da UPS 2 (CB/BT-810002A/B e SAIS) com pelo menos um banco de baterias de cada uma delas. (SPE, SLC).	Crítico
30	Suprir 120VCA para o sistema SAIS a partir da UPS 4 (CB/BT-810004 A/B – SAIS) com pelo menos um banco de baterias de cada uma delas.(SPE,SLC).	Crítico
31	Suprir 120VCA para o sistema SPE a partir de ambas UPS (CB/BT-810002 ^a /B e CB/BT-810004 ^a /B – SPE) com pelo menos um banco de baterias de cada uma delas.	Crítico

Ação	Descrição da recomendação
R23	Avaliar possibilidade de implementação de um ramal de 480 V do PN-514012 direto para o ramal alternativo (do estabilizador).
R24	Revisão do estudo de proteção (seletividade) para o desligamento dos disjuntores (DJ2), dos bancos de baterias.
R25	Substituição da UPS 2. (CB/BT-810002 ^a /B).
R26	Monitorar o descarregamento dos bancos de baterias (CB/BT-810002 ^a /B), através de medição dos valores das correntes elétricas pertinentes a cada banco.
R27	Assegurar a finalização da GIM 3010.49-05-0202 relativa à interligação da UPS CB;BT 810002 e UPS CB;BT 810004.
O14	Avaliar a possibilidade de instalação de um conversor (nas remotas e nos painéis de controle dos PLCs) 120 Vdc/ 24 Vdc com alimentação direta do banco de baterias.
O15	Avaliar a possibilidade de instalação de um conversor nas remotas que atendem ao PN – 514001 e aos TGs.

Tabela 3.4 – Lista de ações por função moderada – SPE.

Função	Descrição da função	Risco
2	Fornecer energia elétrica para pelo menos uma das bombas de carga (MB-122301 ^a , B ou C) (SLC).	Moderado
Ação	Descrição da recomendação	
R7	Verificação do estudo de seletividade dos painéis do Sistema Elétrico.	
O3	Desconsideramos a possibilidade de falha do disjuntor de interligação para a perda da função.	
O4	Há histórico de perda de transformadores na P-B.	
Função	Descrição da função	Risco
3	Suprir 480V para o PN-514006 – <i>Utilities Switchboard</i> – a partir do PN-514001, com pelo menos 1 alimentador (SPE, SPH, SLC).	Moderado
Ação	Descrição da recomendação	
R5	Treinar equipe de manutenção elétrica nos disjuntores ABB e Reles MULTILIN.	
R6	Incluir / confirmar se o PN-514001 – <i>Main Switchboard</i> esta no plano de manutenção SAP/R3.	
Função	Descrição da função	Risco
5	Suprir 480V para o PN-514012 – <i>Essential Switchboard</i> , a partir do PN-514001 com pelo menos 1 alimentador (SPE, SPH, SLC).	Moderado
Ação	Descrição da recomendação	
R9	Incluir / confirmar se o PN-514012 – <i>Essential Switchboard</i> está no Plano de Manutenção SAP/R3.	

Função	Descrição da função	Risco
16	Suprir 480V para o PN-514013 <i>Accommodation Essential</i> 480V MCC a partir do PN-514012 (SPH).	Moderado
17	Suprir 480V para o MB-UH-553501A (bomba principal – HPU Navio) a partir do PN-514013 (SPH).	Moderado
18	Suprir 480V para o MB-UH-553502 (bomba de recirculação – HPU Navio) a partir do PN-514013 (SPH).	Moderado
19	Suprir 480V para o PN-514014 <i>Accommodation Essential</i> 480V MCC a partir do PN-514012 (SPH).	Moderado
20	Suprir 480V para o MB-UH-553501B (bomba principal – HPU Navio) a partir do PN-514014 (SPH).	Moderado
Ação	Descrição da recomendação	
R20	Definir e manter a bordo componentes sobressalentes críticos da HPU (Navio). (Esta recomendação já existe no SPH e no SLC).	
R21	Avaliar possibilidade de prover um sistema UPS em 480 V (ou instalação de uma bomba de menor porte para manter a pressão do sistema hidráulico, com alimentação a partir da UPS de 220 V).	
R22	Avaliar possibilidade de prover uma Bomba de recirculação reserva (reserva).	

3.4 Sistema de automação e intertravamento de segurança (SAIS)

3.4.1 Descrição do sistema (SAIS)

O SAIS ilustrado pela Figura 3.3 é responsável pela automação, controle e operação da plataforma. Ele é composto basicamente de:

- CIS (*Control and Interlocking System*), conjunto de PLC;
- Supervisão ECOS (Estação Central de Operação e Supervisão);
- Unidades terminais remotas;
- Instrumentos sensores;
- Atuadores.

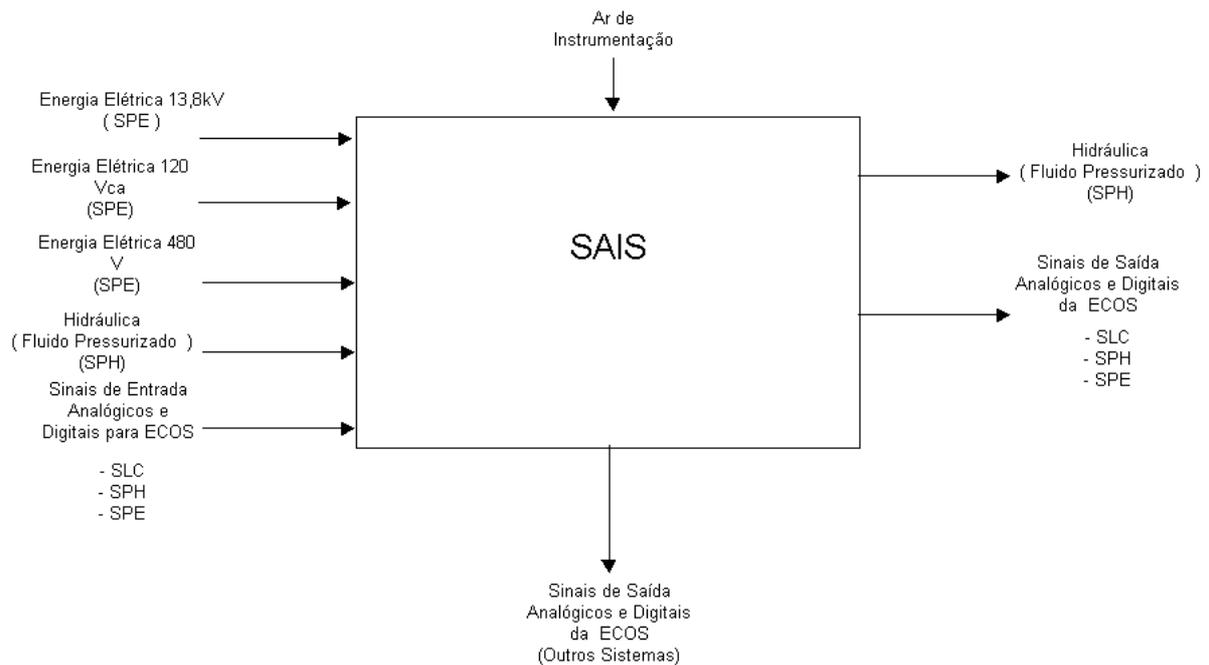


Figura 3.3. Diagrama de blocos SAIS.

Através da análise do módulo funcional do sistema de automação e intertravamento de segurança ilustrado pela Figura 3.3, pode-se identificar as interações deste sistema com os demais sistemas que compõe o escopo da análise (SPE, SLC e SPH). O SAIS recebe energia elétrica nas tensões 13,8 KV, 480 V e 120 Va do SPE, recebe fluido hidráulico pressurizado do SPH e envia e recebe sinais analógicos e digitais através do sistema supervisor, os elementos sensores e atuadores dos demais sistemas.

3.4.1.1 CIS (*Control and Interlocking System*)

Entende-se por sistemas de controle, monitoração e intertravamento de segurança o conjunto composto por:

- Sistemas de tratamento de sinais de campo, especificamente para a plataforma P-A, controladores lógicos programáveis (PLC), quer sejam remotos quer estejam localizados na sala de controle;
- Painéis para abrigar os componentes do sistema de tratamento de sinais;
- Redes de comunicação entre CPU e remotas de campo;
- Redes ETHERNET para comunicação com as IHM (Interface homem-máquina);
- *Drivers* de comunicação;
- IHMs (Interface homem-máquina);
- *Softwares* de operação e supervisão;
- Aplicativos para os sistemas de tratamento de sinais;
- *Softwares* de gerenciamento de manutenção;
- Microcomputador e dispositivos de gerenciamento de manutenção;
- Interligação e integração com a ECOS de pacotes que disponham do seu próprio sistema de controle, monitoração e intertravamento.

O CIS da plataforma, baseado em controladores lógicos programáveis – PLC desempenha todas as funções de controle e segurança relacionadas aos seguintes subsistemas da plataforma: controle; sistema elétrico, ESD (*Emergency Shutdown* - Desligamento), F&G (fogo e gás) /VAC (ventilação e ar-condicionado) /CO₂ e Vessel (lastro e carregamento).

O sistema de PLC é composto de pelo menos cinco seções, uma para cada subsistema acima, compondo o painel PN-552002 – *Control and Safety Interlocking PLC Panel*.

3.4.1.2 Supervisão ECOS (Estação central de operação e supervisão)

O objetivo deste sistema é permitir ao operador, a partir de uma estação de trabalho (na sala de controle), executar a maioria das funções necessárias à operação e supervisão de um processo. Por tratar-se de uma ferramenta computacional gráfica, a estação de trabalho utilizada em sua implantação deve disponibilizar a interação com o usuário através de monitor de alta resolução, teclado e dispositivo de indicação (*mouse ou track-ball*). As funções mínimas implantadas no sistema de operação e supervisão são listadas a seguir:

- Apresentação de valores de variáveis de processo em tempo real;
- Geração de gráficos de tendência de variáveis de processo
- Anunciação de alarmes através de emissão de mensagens, alteração de cor de objetos e/ou anunciação sonora;
- Reconhecimento de alarmes;
- Sinalização de estado operacional de equipamentos (ligado, desligado, falha e manutenção);
- Acionamento e desligamento de equipamentos e detecção de falha (se aplicável);
- Colocação de equipamentos na condição de falha e na condição de manutenção, se aplicável;
- Atuação manual de ESD e combate a incêndio (válvulas de dilúvio inclusive);
- Abertura e fechamento de válvulas;
- Abertura e fechamento de dispositivos elétricos;
- Alteração de parâmetros de operação: *by-pass* de pontos de entrada, *override* de pontos de saída, parametrização de controladores e totalizadores;

- Registro de eventos;
- Registro histórico de variáveis de processo, de alarmes e de eventos;
- Armazenamento, recuperação e alteração *on-line* de dados de equipamentos;
- Recuperação e histórico dos horímetros de operação, falha e manutenção dos equipamentos;
- Emissão de relatórios.

3.4.1.3 Unidades terminais remotas

Painéis, distribuídos pelas unidades, aos quais se conectam os dispositivos de sensoriamento (instrumentos) e acionamento (atuadores) do campo, responsáveis pelo trânsito de informações entre os subsistemas de controle, elétrico, ESD (*Emergency Shutdown* - desligamento), F&G/VAC/CO2 e lastro/carregamento, com o sistema ECOS.

3.4.1.4 Instrumentos sensores

Todos os instrumentos interligados a entradas do sistema de tratamento de sinais (remotas).

3.4.1.5 Atuadores

Todos os dispositivos finais de atuação e controle: válvulas, posicionadores, solenóides, etc.

3.4.2 Resultados da FMECA para o sistema SAIS

O sistema foi analisado por meio da identificação de suas funções. A Tabela 3.5 ilustra as funções que foram determinadas para o SAIS da plataforma P-A.

Tabela 3.5 – Lista de funções determinadas (SAIS).

Item	Descrição da função	Risco
1	Transitar informações entre as Estações da ECOS (PN-552001 A/B/C/D/E/F/G/H/J/K/L) e os CIS (PN-552002): (SAIS, SPE, SLC e SPH) CIS – <i>Control Interlocking System</i> (Sistema de Controle e Intertravamento).	Não crítico
2	Trânsito de Informações entre PN-552002 (CIS) e as seguintes Remotas (SPE): PN-514001;PN-552004P;PN-552004Q;PN-514006;PN-514007 PN-514008;PN-514012;PN-514013;PN-514014;PN-552004J; PN-552004K; PN-552004V;	Moderado
3	Trânsito de sinais analógicos e digitais entre os elementos iniciais e finais e seus respectivos painéis remotos (SPE): PN-514001; PN-552004P; PN-552004Q; PN-514006; PN-514007 PN-514008; PN-514012; PN-514013; PN-514014; PN-552004J PN-552004K; PN-552004V	Moderado
4	Trânsito de Informações entre PN-552002 (CIS) e as seguintes Remotas (SPH): PN-552004M; PN-552004N; PN-552004W; PN-552004X	Moderado
5	Trânsito de sinais analógicos e digitais entre os elementos iniciais e finais e seus respectivos painéis remotos (SPH): PN-552004M; PN-552004N; PN-552004W; PN-552004X	Crítico
6	Trânsito de Informações entre PN-552002 (CIS) e as seguintes Remotas (SLC): PN-552004M; PN-552004X; PN-552004W; PN-552004N PN-552004P; PN-552004Q; PN-514006; PN-514011 PN-514012; PN-514007; PN-514008; PN-514034 PN-514035; PN-552004 ^a ; PN-552004L1	Não crítico
7	Trânsito de sinais analógicos e digitais entre os elementos iniciais e finais e seus respectivos painéis remotos (SLC): PN-552004M; PN-552004X; PN-552004W; PN-552004N PN-552004P; PN-552004Q; PN-514006; PN-514011 PN-514012; PN-514007; PN-514008; PN-514034 PN-514035; PN-552004 ^a ; PN-552004L1	Crítico

Item	Descrição da função	Risco
8	Transitar informações entre o CIS (PN-552002) e o PN-552005 (Unidade de controle dos tanques de carga).	Não crítico
9	Transitar sinais analógicos e digitais entre o PN-552005 (unidade de controle dos tanques de carga) e seus respectivos elementos iniciais e finais.	Não crítico
10	Transitar informações entre o PN-552005 e a estação de trabalho (CMS) / Calculador de Esforços.	Não crítico
11	Transitar informações entre o Calculador de Esforços e as Estações de trabalho (ECOS).	Não crítico
12	Transitar informações entre as Estações da ECOS (PN-552001 A/B/C/D/E/F/G/H/J/K) e o EGCP (Painel de Controle do Gerador de Emergência).	Não crítico
13	Trânsito de informações entre EGCP e as seguintes Remotas (SPE): PN-552004R; PN-552004T	Não crítico
14	Trânsito de Informações entre EGCP e os elementos iniciais e finais dos Geradores de Emergência (SPE).	Moderado

Após o preenchimento das planilhas de FMECA, a tarefa seguinte foi levantar a quantidade de funções identificadas por categoria de frequência, de severidade e de criticidade. Tais resultados para o sistema de automação e intertravamento de segurança da plataforma FPSO P-A são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Estatística da FMECA (SAIS).

Risco	Funções	Percentual
Crítico	2	14 %
Moderado	4	29 %
Não crítico	8	57 %
Total	14	100 %

O segundo sistema com maior número de funções identificadas foi o sistema SAIS, com 14 ao todo.

Em termos de risco, os resultados da classificação das funções do SAIS da plataforma P-A podem ser identificados pela matriz de riscos representada pela Figura 3.4.

SEVERIDADE					
Catastrófica	IV	2	0	0	0
Crítica	III	0	0	0	0
Moderada	II	1	0	1	2
Desprezível	I	5	1	1	1
		A	B	C	D
		Extremamente Remota	Remota	Provável	Frequente

Figura 3.4 - Matriz de riscos por função SAIS da plataforma P-A.

Com relação ao nível de criticidade, 2 (duas) funções (14%) apresentaram a categoria de risco crítico, enquanto que 4 (quatro) funções (29%) apresentaram a categoria de risco moderado e 8 (oito) funções (57%) apresentaram a categoria de risco não crítico.

O risco foi considerado intolerável (crítico ou moderado) para 43 % das 14 (quatorze) funções identificadas. Para mitigar este risco, entre recomendações e observações, foram elaboradas 10 (dez) ações. Estas ações foram agrupadas conforme sua prioridade e são apresentadas nas Tabelas 3.7 e 3.8.

Tabela 3.7 – Lista de ações por função crítica – SAIS.

Função	Descrição da função	Risco
5	Trânsito de sinais analógicos e digitais entre os elementos iniciais e finais e seus respectivos painéis remotos (SPH): PN-552004M; PN-552004N; PN-552004W; PN-552004X	Crítico
7	Trânsito de sinais analógicos e digitais entre os elementos iniciais e finais e seus respectivos painéis remotos (SLC): PN-552004M; PN-552004X; PN-552004W; PN-552004N, PN-552004P; PN-552004Q; PN-514006; PN-514011,PN-514012; PN-514007; PN-514008; PN-514034 PN-514035; PN-552004 ^a ; PN-552004L1	Crítico

Ação	Descrição da recomendação
R31	Reavaliar / Definir estoque de sobressalentes a bordo (componentes do SAIS).
R32	Implantar sistema de identificação/monitoramento e sinalização na ECOS de problemas de fuga a terra em cabos e componentes iniciais e finais do SAIS.
R33	Analisar no <i>ladder</i> de acionamento das válvulas de fundo, se em caso de falha dos Indicadores Volumétricos de Posição – VPI (sinal abaixo de 3,5mA e acima de 20,5mA), ocorre bloqueio de comando das respectivas solenóides. Se não ocorrer, esta lógica deverá ser implantada.
R34	Treinar as equipes de manutenção/ instrumentação/ automação em VPI.

Tabela 3.8 – Lista de ações por função moderada – SAIS.

Função	Descrição da função	Risco
2	Trânsito de Informações entre PN-552002 (CIS) e as seguintes Remotas (SPE): PN-514001;PN-552004P;PN-552004Q;PN-514006;PN-514007 PN-514008;PN-514012;PN-514013;PN-514014;PN-552004J; PN-552004K; PN-552004V;	Moderado
Ação	Descrição da recomendação	
R30	Revisar padrão (SINPEP) para a partida do gerador de emergência, a partir dos resultados da análise da lógica do intertravamento para partida do gerador de emergência (Incluindo seus disjuntores e painel essencial). Levar em consideração a partida com a falta total da automação.	
R31	Reavaliar / Definir estoque de sobressalentes a bordo (componentes do SAIS).	
O16	A análise da lógica do intertravamento para partida do gerador de emergência deverá ser realizada e contemplar os efeitos desta falha.	
O17	Avaliar a possibilidade de instalação de um conversor (nas remotas e nos painéis de controle dos PLC) 120 Vdc/ 24 Vdc com alimentação direta do banco de baterias.	
Função	Descrição da função	Risco
3	Trânsito de sinais analógicos e digitais entre os elementos iniciais e finais e seus respectivos painéis remotos (SPE): PN-514001; PN-552004P; PN-552004Q; PN-514006; PN-514007 PN-514008; PN-514012; PN-514013; PN-514014; PN-552004J PN-552004K; PN-552004V	Moderado
Ação	Descrição da recomendação	
R31	Reavaliar / Definir estoque de sobressalentes a bordo (componentes do SAIS).	
R32	Implantar sistema de identificação/monitoramento e sinalização na ECOS de problemas de fuga a terra em cabos e componentes iniciais e finais do SAIS.	

Função	Descrição da função	Risco
4	Trânsito de informações entre PN-552002 (CIS) e as seguintes Remotas (SPH): PN-552004M; PN-552004N; PN-552004W; PN-552004X	Moderado
R31	Reavaliar / Definir estoque de sobressalentes a bordo (componentes do SAIS).	
O16	A análise da lógica do intertravamento para partida do gerador de emergência deverá ser realizada e contemplar os efeitos desta falha.	
O17	Avaliar a possibilidade de instalação de um conversor (nas remotas e nos painéis de controle dos PLC) 120 Vdc/ 24 Vdc com alimentação direta do banco de baterias.	
Função	Descrição da função	Risco
14	Trânsito de Informações entre EGCP e os elementos iniciais e finais dos Geradores de Emergência (SPE).	Moderado
Ação	Descrição da recomendação	
R31	Reavaliar / Definir estoque de sobressalentes a bordo (componentes do SAIS).	
R35	Elaborar procedimento SINPEP das ações envolvidas para continuidade operacional, considerando a ausência da automação, visando conduzir a condição de segurança.	

3.5 Sistema de Lastro e Carregamento (SLC)

3.5.1 Descrição do sistema (SLC)

O sistema de lastro e carregamento é composto por dois subsistemas. O sistema de lastro é utilizado quando a unidade está descarregada, seus tanques recebem água de lastro para manter o equilíbrio, sua estabilidade, movimentos e integridade estrutural. Quando a unidade está carregada, a água é lançada ao mar. O outro subsistema é o sistema de carregamento, composto pelos tanques de óleo, que além de estocarem o petróleo produzido também desempenham um papel importante quanto ao equilíbrio, à estabilidade, os movimentos e a integridade estrutural da unidade.

Cabe ressaltar que os subsistemas não têm interligação física, ou seja, a água de lastro não se comunica com os tanques de petróleo. Entretanto, juntos, esses dois subsistemas buscam garantir o equilíbrio e a estabilidade da unidade.

O sistema de lastro consiste basicamente de duas operações para deslocar a unidade da condição de calado máximo para a condição de calado mínimo em 24 horas:

- Deslastro/lastro do peak tanque de vante (TQ-533501) pelas duas bombas submersas de lastro (B-533501 A/B) e pelos dois edutores de lastro (E-533502 A/B);
- Deslastro/lastro do tanque (TQ-533503C) pelas duas bombas submersas de lastro (B-533502 A/B) e pelos dois edutores de lastro (E-533501 A/B), bombas de esgoto, lastro e resfriamento do sistema de gás inerte e bomba de esgoto de serviços gerais (B-542503) em caso de emergência.

A representação gráfica do sistema SLC por diagrama de blocos é ilustrada pela

Figura 3.5.

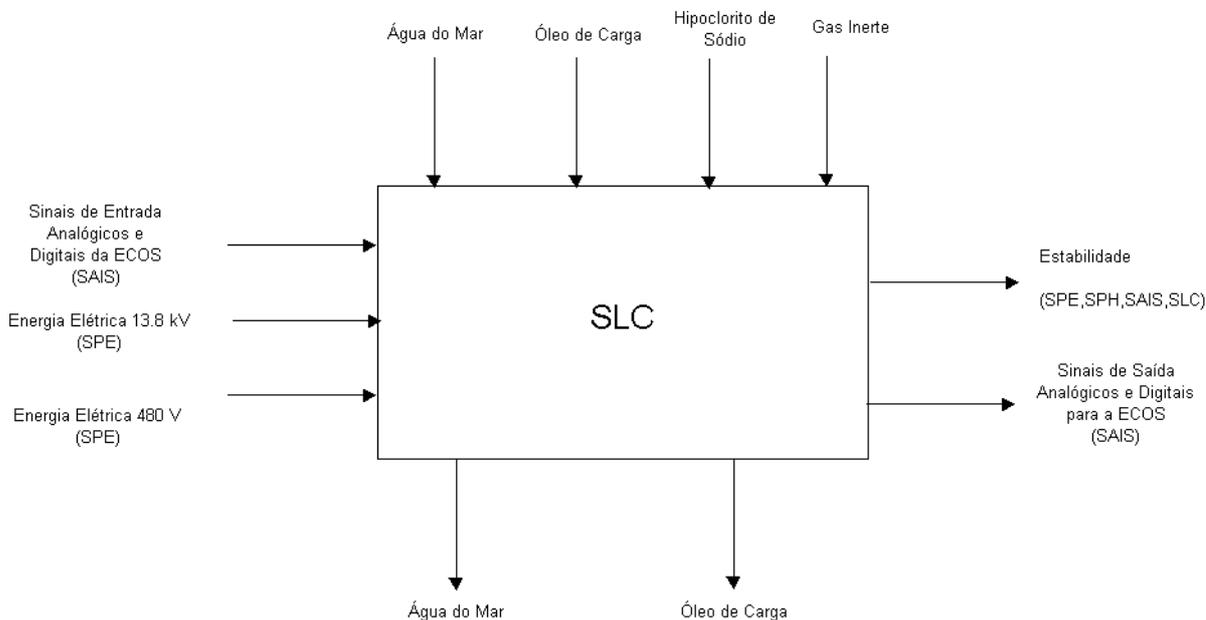


Figura 3.5 - Diagrama de blocos SLC.

Através da análise do módulo funcional do sistema de lastro e carregamento ilustrado pela Figura 3.5, pode-se identificar as interações deste sistema com os demais sistemas que compõe o escopo da análise (SPE, SAIS e SPH). O SLC recebe energia elétrica nas tensões de 13,8 KV e 480V do SPE e envia e recebe sinais analógicos e digitais com o SAIS.

3.5.1.1 Equipamentos e tanques

Os principais dados técnicos dos equipamentos pertencentes a este sistema estão descritos a seguir.

Bomba de lastro (B-533501 A/B, B-533502 A/B). Suas características técnicas são descritas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Características da bomba de lastro.

Características	Dados
Capacidade	825 m ³ /h
Temperatura	29° C
Pressão de operação	684 kPa

Edutor de lastro (B-533501 A/B, B-533502 A/B). Suas características técnicas são descritas na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Características do edutor de lastro.

Características	Dados
Capacidade	45 m ³ /h
Temperatura	25° C

Bomba de esgoto e serviços gerais (B-542503). Suas características técnicas são descritas na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Características da bomba de esgoto e serviços gerais.

Características	Dados
Capacidade	45 m ³ /h
Temperatura	25° C

Tanques de lastro. Suas características técnicas são descritas na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Características do tanque de lastro.

TAG	Nome
TQ-533501	Tanque de colisão de vante
TQ-533503 C	Tanque de lastro nº3 central
TQ-533504	Tanque de colisão de ré

Bomba de carga (B-122301 A/B/C). Suas características técnicas são descritas na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 – Características da bomba de carga.

Características	Dados
Capacidade	3412 m ³ /h
Temperatura	40° C
Pressão de operação	1618 kPa

Tanques de carga. Suas características técnicas são descritas na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 – Características dos tanques de carga.

TAG	Nome
TQ-600005 P	Tanque de carga bombordo
TQ-600005 C	Tanque de carga central
TQ-600005 S	Tanque de carga boreste

3.5.1.2 Operação Lastro/Deslastro

O deslastro/lastro dos tanques (TQ-533501/03C) será realizado pelas duas bombas de lastro (B-533501-2 A/B), instaladas dentro dos tanques, os quais podem operar simultaneamente, através da rede principal de lastro (instalada no interior dos tanques de lastro), com ramais para esgotamentos através de dois edutores de lastro (E-533501-2 A/B) para cada tanque.

Nas operações de deslastro as bombas submersas de cada tanque descarregarão para o mar através de descarga para o costado e na operação de lastro as bombas submersas (B-533501A/B) instaladas no *peak* tanque, farão a sucção da caixa de mar e descarregarão para os referidos tanques TQ-533501/03C.

3.5.1.3 Operação Lastro/Deslastro do *peak* tanque de ré

Todas as válvulas do sistema de lastro na praça de máquinas são do tipo hidráulica e controladas remotamente pela ECOS.

O lastro/deslastro do tanque TQ-533504 (*peak* tanque de ré) será realizado, em emergência, pela bomba de esgoto e serviços gerais (B-542503) ou pela bomba de circulação do gás inerte PN-MB-542.502 através de uma rede dedicada, a qual se interliga aos *manifolds* de aspiração e descarga das bombas principais de lastro.

Nas operações de lastro/deslastro, a bomba B-542503 descarregará para o mar através da descarga de costado e fará a sucção através da caixa de mar. A bomba de circulação do gás inerte será também utilizada para esta finalidade.

Quando a bomba de serviços gerais for utilizada em emergência, o operador de embarcação deverá abrir as válvulas (XV-5330701/715) para intercomunicação dos manifolds das bombas. Antes de iniciar qualquer operação, o operador de embarcação deverá certificar-se de que o sistema de medição de níveis de tanques encontra-se operacional, pois o nível será monitorado durante toda operação.

3.5.1.4 Carregamento e transferência de carga dos tanques de carga 5 P/C/S

A operação do sistema de carga consiste em receber óleo dos *risers* e distribuí-lo nos tanques de carga conforme o plano de carregamento. Com a finalidade de controlar os efeitos de banda e/ou trim da embarcação e de garantir sua estabilidade, as bombas de carga (B-122301A/B/C) são utilizadas para carregar e descarregar os tanques de carga (TQ-600005C/P/S).

Através das válvulas de fundo, o operador poderá, também, proceder à transferência entre quaisquer tanques de carga utilizando o princípio da gravidade (vasos comunicantes), porém este método é um artifício para o controle de banda e/ou trim.

Observou-se que, nessa unidade, a distribuição de carga é mais relevante para sua estabilidade do que a de lastro, uma vez que, em regime normal de operação os tanques de lastro permanecem vazios.

3.5.2 Resultados da FMECA para o sistema SLC

A Tabela 3.15 apresenta as funções que foram determinadas para o SLC da plataforma P-A.

Tabela 3.15 - Lista de funções determinadas (SLC).

Item	Descrição da função	Risco
1	Lastrar e Deslastrar o Tq.No3C, Peak Tk Vante e Peak Tk de Ré.	Moderado
2	Transferir carga entre Tanques de Carga 5P / C / S utilizando as bombas de carga B-122301A/B/C.	Moderado
3	Transferir Carga entre Tanques de Carga por gravidade (para Bombordo).	Moderado
4	Receber e enviar sinais analógicos e digitais para ECOS.	Não crítico
5	Esgotar a praça de maquinas em caso de alagamento com a M-B-511103 Bomba Lift de Emergência.	Crítico

Após o preenchimento das planilhas de FMECA, a tarefa seguinte foi levantar a quantidade de funções identificadas por categoria de frequência, de severidade e de criticidade. Os resultados para o sistema de lastro e carregamento da plataforma FPSO P-A são apresentados na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 – Estatística da FMECA (SLC).

Risco	Funções	Percentual
Crítico	1	20 %
Moderado	3	60 %
Não crítico	1	20 %
Total	5	100 %

O terceiro sistema com maior número de funções identificadas foi o sistema SLC, com 5 ao todo.

Em termos de risco, os resultados da classificação das funções do SLC da plataforma P-A podem ser identificados pela matriz de riscos apresentada na Figura 3.6.

SEVERIDADE					
Catastrófica	IV	0	1	0	0
Crítica	III	2	1	0	0
Moderada	II	0	0	0	0
Desprezível	I	0	0	1	0
		A	B	C	D
		Extremamente Remota	Remota	Provável	Frequente

Figura 3.6 - Matriz de riscos por função SLC da Plataforma P-A.

Com relação ao nível de criticidade, 1 (uma) função (20%) apresentou a categoria de risco crítico enquanto 3 (três) funções (60%) apresentaram a categoria de risco moderado e uma função (20%) apresentou a categoria de risco não-crítico.

O risco foi considerado intolerável (crítico ou moderado) para 80% das 5 (cinco) funções identificadas. Para mitigar este risco, entre recomendações e observações, foram elaboradas 8 (oito) ações. Estas ações foram agrupadas conforme sua prioridade e são apresentadas nas Tabelas 3.17 e 3.18.

Tabela 3.17 – Lista de ações por função crítica – SLC P-A.

Função	Descrição da função	Risco
5	Esgotar a praça de maquinas em caso de alagamento com a M-B-511103 Bomba Lift de Emergência.	Crítico
Ação	Descrição da recomendação	
R42	Implantar uma rotina de teste de detecção de falhas para estas bombas para avaliação de falhas ocultas.	

Tabela 3.18 – Lista de ações por função moderada – SLC P-A.

Função	Descrição da função	Risco
1	Lastrar e Deslastrar o Tq.No3C, Peak Tk Vante e Peak Tk de Ré.	Moderado
Ação	Descrição da recomendação	
R36	Reavaliar o sistema alternativo de bomba manual (portátil) utilizado para abertura e fechamento das válvulas (SLC) por ser demasiadamente lento.	
Função	Descrição da função	Risco
2	Transferir carga entre Tanques de Carga 5P / C / S utilizando as bombas de carga B-122301A/B/C.	Moderado
Ação	Descrição da recomendação	
R36	Reavaliar o sistema alternativo de bomba manual (portátil) utilizado para abertura e fechamento das válvulas (SLC) por ser demasiadamente lento.	
R37	Prover iluminação interna para os Painéis hidráulicos locais na HPU do Navio.	
R38	Prover treinamento evidenciado de utilização das bombas manuais para as válvulas da HPU do Navio para os operadores da embarcação.	
R39	Elaborar procedimento (SINPEP) das ações de transferência de carga entre os tanques de carga 5P / C / S utilizando as bombas de carga B-122301A/B/C.	
Função	Descrição da função	Risco
3	Transferir Carga entre Tanques de Carga por gravidade (para Bombordo).	Moderado
Ação	Descrição da recomendação	
R36	Reavaliar o sistema alternativo de bomba manual (portátil) utilizado para abertura e fechamento das válvulas (SLC) por ser demasiadamente lento.	
R40	Avaliar possibilidade de prover um sistema UPS (ou instalação de uma bomba de menor porte para manter a pressão do sistema hidráulico) com alimentação da UPS de 220 V.	
R41	Restabelecer e garantir a funcionalidade das juntas de expansão dos tanques de carga, onde aplicável.	

3.6 Sistema de Potência Hidráulica (SPH)

3.6.1 Descrição do sistema (SPH)

A Figura 3.7 apresenta a unidade de potência hidráulica UH-533501 que recebe alimentação elétrica e sinais de instrumentação, recebe e fornece informações para o sistema ECOS e fornece fluido hidráulico pressurizado em circuito fechado através dos

diversos *racks* de distribuição hidráulica para o acionamento das válvulas e o recebe de volta do retorno das válvulas operadas.

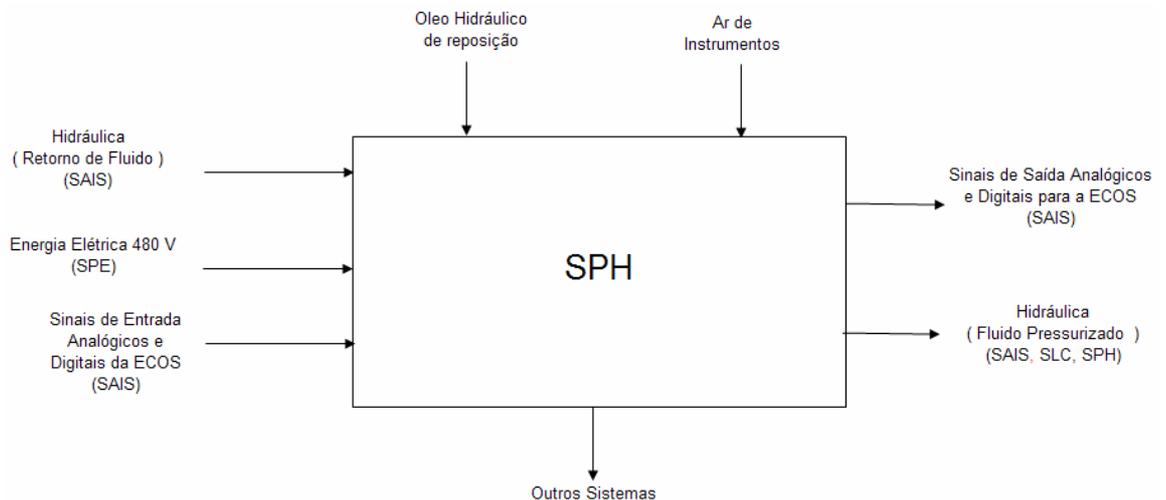


Figura 3.7 - Diagrama de blocos SPH.

Considerou-se que o sistema de potência hidráulica é essencial para a segurança da unidade ao permitir a atuação, abertura ou fechamento, das válvulas do sistema de carga e lastro. Estas válvulas são fundamentais para as manobras de estabilização da unidade, pela transferência de lastro ou carga de/para ou entre tanques.

Falhas nos componentes da unidade hidráulica: reservatório, bombas, instrumentação, filtros, válvulas de segurança, válvulas diversas (manuais / direcionais), atuadores, acumuladores ou conexões podem levar seqüencialmente à perda da disponibilidade de fluido pressurizado de controle das válvulas e à conseqüente impossibilidade de manobras para manutenção e/ou restabelecimento da estabilidade da unidade.

3.6.2 Resultados da FMECA para o sistema SPH

A Tabela 3.19 apresenta as funções que foram determinadas para o SPH da plataforma P-A.

Tabela 3.19 – Lista de funções determinadas (SPH).

Item	Descrição da função	Risco
1	Fornecer fluido hidráulico pressurizado a partir da UH-553501 (NAVIO) para os seguintes painéis hidráulicos: PN-553501A/D; PN-553502A/D; PN-553503A/L.	Crítico
2	Fornecer fluido hidráulico pressurizado para os seus respectivos elementos finais a partir dos seguintes painéis hidráulicos. (NAVIO): PN-553501A/D; PN-553502A/D; PN-553503A/L.	Crítico
3	Fornecer fluido hidráulico para os seus respectivos elementos finais a partir da HPU UH-533501. (LASTRO).	Moderada
4	Receber e enviar sinais analógicos e digitais para ECOS.	Moderada

Após o preenchimento das planilhas de FMECA, a tarefa seguinte foi levantar a quantidade de funções identificadas por categoria de frequência, de severidade e de criticidade. Tais resultados para o sistema de potência hidráulica da plataforma FPSO P-A são apresentados na Tabela 3.20.

Tabela 3.20 – Estatística da FMECA (SPH).

Risco	Funções	Percentual
Crítico	2	50 %
Moderado	2	50 %
Não crítico	0	0 %
Total	4	100 %

Para o sistema SPH foram identificadas 4 (quatro) funções ao todo. Em termos de risco, os resultados da classificação das funções do SPH da plataforma P-A podem ser identificados pela matriz de riscos apresentada na Figura 3.8.

SEVERIDADE					
Catastrófica	IV	0	0	2	0
Crítica	III	0	0	0	0
Moderada	II	0	0	2	0
Desprezível	I	0	0	0	0
		A	B	C	D
		Extremamente Remota	Remota	Provável	Frequente

Figura 3.8 - Matriz de riscos por função SPH da plataforma P-A.

Com relação ao nível de criticidade, 2 (duas) funções (50%) apresentaram a categoria de risco crítico e 2 (duas) funções (50%) apresentaram a categoria de risco moderado.

O risco foi considerado intolerável (crítico ou moderado) para 100 % das 4 (quatro) funções identificadas. Para mitigar este risco, entre recomendações e observações, foram elaboradas 10 (dez) ações. Estas ações foram agrupadas conforme sua prioridade e são apresentadas nas Tabelas 3.21 e 3.22.

Tabela 3.21 – Lista de ações por função crítica – SPH.

Função	Descrição da função	Risco
1	Fornecer fluido hidráulico pressurizado a partir da UH-553501 (NAVIO) para os seguintes painéis hidráulicos: PN-553501A/D; PN-553502A/D; PN-553503A/L.	Crítico
Ação	Descrição da recomendação	
R43	Implantar rotina de inspeção para o header hidráulico principal HPU / racks hidráulicos, PSVs e reservatório de fluido hidráulico da unidade.	
R44	Manter a bordo componentes sobressalentes críticos (ex. Kit das Bombas principal e circulação) da HPU (Navio).	
R45	Avaliar a necessidade de criação de procedimento para evitar o escalonamento da perda de pressão na HPU, afetando outros sistemas.	
O19	Reavaliar a operacionalidade (para reabastecimento) do fluido hidráulico utilizado no SPH, sob os aspectos de perda de especificação e/ou contaminação do mesmo.	
Função	Descrição da função	Risco
2	Fornecer fluido hidráulico pressurizado para os seus respectivos elementos finais a partir dos seguintes painéis hidráulicos. (NAVIO): PN-553501A/D; PN-553502A/D; PN-553503A/L.	Crítico
Ação	Descrição da recomendação	
R46	Manter a bordo componentes sobressalentes críticos (Válvulas direcionais) dos painéis hidráulicos PN-553501A/D, PN-553502A/D e PN-553503A/L.	
R47	Implantar faixa de operação de indicação de pressão nos painéis locais.	
O19	Reavaliar a operacionalidade (para reabastecimento) do fluido hidráulico utilizado no SPH, sob os aspectos de perda de especificação e/ou contaminação do mesmo.	

Tabela 3.22 – Lista de ações por função moderada – SPH.

Função	Descrição da função	Risco
3	Fornecer fluido hidráulico para os seus respectivos elementos finais a partir da HPU UH-533501.(LASTRO).	Moderada
Ação	Descrição da recomendação	
R48	Reavaliar a periodicidade da rotina de teste das bombas hidráulicas B-533501A/B e B-533502A/B, previstos no plano de manutenção SAP R/3.	
R49	Implantar rotina de inspeção das bombas de Lastro (manutenção por oportunidade), associado à inspeção de renovação/manutenção de classe dos tanques.	

Função	Descrição da função	Risco
4	Receber e enviar sinais analógicos e digitais para ECOS.	Moderada
Ação	Descrição da recomendação	
R50	Melhorar os dispositivos de detectibilidade priorizando os alarmes visuais e sonoros na ECOS.	
R51	Melhorar a identificação das válvulas no painel de forma a diminuir a probabilidade de acionamento equivocado pelo operador.	

3.7 Resultados Globais FMECA FPSO P-A

Os resultados globais da análise de riscos qualitativa através da metodologia de FMECA considerando todos os sistemas analisados para a unidade marítima de produção FPSO P-A encontram-se sumarizados em termos de risco de perda da função na Tabela 3.23.

Tabela 3.23 – Análise do risco de perda da função (FPSO P-A).

Risco perda Função	Qtde	%	Acumulado
Críticas	10	19%	19%
Moderadas	18	33%	52%
Não - críticas	26	48%	100%
Total	54		

Durante a FMECA foram identificadas 54 (cinquenta e quatro) funções, dentre os subsistemas avaliados, relacionadas a possíveis seqüências de eventos que podem levar a unidade marítima flutuante de produção FPSO P-A a perder a capacidade de restauração da condição de equilíbrio da unidade.

Destas funções, 28 (vinte e oito) foram associadas a falhas funcionais com risco crítico e/ou moderado para a estabilidade da unidade. Para estas 28 (vinte e oito) funções, que representam 52% do total de funções identificadas como relevantes neste estudo, foram elaboradas 52 (cinquenta e duas) recomendações e 19 (dezenove) observações que visam, em última análise, diminuir o risco de adernamento e afundamento.

Essas ações estão distribuídas entre os sistemas estudados da seguinte forma:

- SPE - **28** Recomendações e **15** observações; (61 % das ações definidas).
- SAIS - **08** Recomendações e **02** observações; (14 % das ações definidas).
- SLC - **07** Recomendações e **01** observação; (11, % das ações definidas).
- SPH - **09** Recomendações e **01** observação; (14 % das ações definidas).

Deve-se iniciar a implantação dessas ações priorizando-se as 24 (vinte e quatro) recomendações que contemplam as funções consideradas críticas e depois as 28 (vinte e oito) recomendações restantes que tratam das funções moderadas, cobrindo assim 52% das funções identificadas como relevantes (funções críticas e moderadas) pelo estudo conforme ilustrado na Figura 3.9.

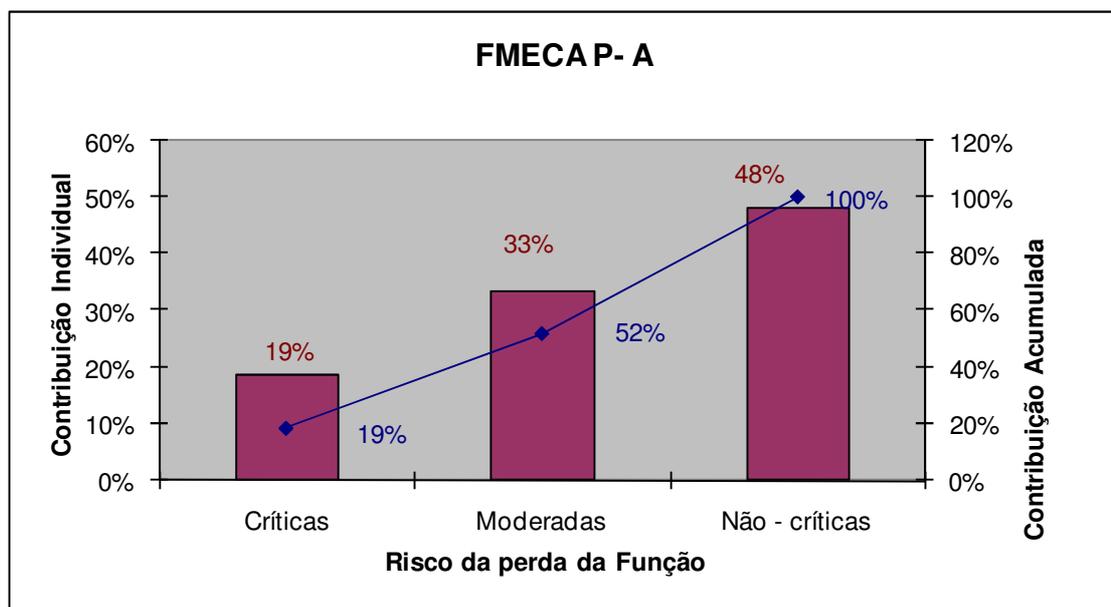


Figura 3.9 – Risco de perda da função P-A.

4 ANÁLISE QUANTITATIVA POR ÁRVORE DE FALHAS

Este capítulo apresenta o estudo de confiabilidade funcional realizado a partir dos resultados da análise qualitativa por FMECA usando a técnica de modelagem por árvores de falhas. De acordo com a ET-3000.00-5400-983-PAK-001 (2004), os cenários identificados na FMECA qualitativa com riscos críticos ou moderados foram contemplados na modelagem de forma a permitir a estimação das confiabilidades funcionais para cada um dos sistemas analisados (SPE, SAIS, SLC e SPH).

Os eventos de topo foram denominados como a “incapacidade de restauração da condição de equilíbrio da unidade de devido a falhas nos sistemas SPE, SAIS, SLC, SPH” e a partir do cálculo da probabilidade de ocorrência destes eventos, estimou-se a confiabilidade funcional de cada sistema.

4.1 Premissas do modelo de árvore de falhas

A seguir são descritas as premissas que nortearam as análises de árvore de falhas dos sistemas da plataforma FPSO P-A a partir da FMECA.

- Considerou-se como falha funcional o descumprimento de uma função identificada na FMECA;
- Foram considerados todos os modos de falha cuja criticidade identificada no FMECA tenha sido considerada como risco crítico ou moderado;
- Considerou-se que esses cenários identificados pelos especialistas como críticos ou moderados eram suficientes para causar a perda da função identificada e

poderiam comprometer a recuperação da condição de equilíbrio da plataforma num cenário de emergência;

- Os cenários cujas funções foram consideradas de baixa criticidade não foram contemplados no modelo.
- Os cenários referentes à operação da unidade e impactos na sua produção não foram analisados, somente as interfaces entre os sistemas de potência elétrica, automação e intertravamento de segurança, potência hidráulica e lastro e carregamento do ponto de vista da segurança da unidade.
- Os tempos médios até as falhas (MTTF) usados foram escolhidos com base nas taxas de falhas definidas pelos especialistas na fase de análise qualitativa. Estes tempos foram definidos com base na experiência do grupo e na tabela de frequência das falhas conforme descrito no Capítulo 2;
- Usou-se a distribuição exponencial para o modelo devido à unidade encontrar-se no período de vida útil (região II da curva da banheira) e estar sujeita predominantemente a falhas aleatórias.
- A confiabilidade funcional foi calculada para permitir a análise do desempenho dos sistemas analisados e de suas interações em termos de segurança operacional e para permitir a comparação entre os mesmos.
- Em estudos típicos de confiabilidade têm usado o tempo calendário de um ano (365 dias vezes 24 horas, $t = 8760$ horas) como parâmetro de referência para a avaliação das curvas da função confiabilidade ao longo do tempo, por isso adotou-se esse valor para o tempo de missão.
- Estudos de confiabilidade da Associação Americana da Qualidade têm usado o valor de 90% para o cálculo dos limites de confiança como referência. Utilizou-

se neste trabalho um limite de confiança de 90% para a avaliação do parâmetro MTTF estimado para cada sistema.

- Não foram consideradas estratégias preventivas de reparo ou manutenção para os componentes do modelo visto que se assumiu uma distribuição exponencial com taxa de falha constante.

4.2 Dados de entrada para a FTA

Para o modelo de árvore de falhas não foram usados dados reais (oriundos do campo), pois os mesmos não estavam disponíveis na época da elaboração do estudo. Outra possibilidade seria a utilização de dados de falhas provenientes de banco de dados internacionais tais como OREDA (2002), entretanto a estrutura funcional do FMECA o qual toda a análise foi baseada em funções e não em componentes, inviabilizou esta possibilidade visto que os bancos de dados internacionais são montados com base nas falhas de componentes.

Optou-se pelo uso das frequências de falha definidas pelos especialistas da Petrobras com base na Tabela 2.1 extraída da ET-3000.00-5400-983-PAK-001 (2004) para alimentar o modelo. Esta tabela apresenta uma faixa genérica para o comportamento das falhas dos componentes em função do tempo. Com base nesta tabela e na experiência da equipe de especialistas foram definidos os valores de frequência de ocorrência das falhas funcionais identificadas na FMECA e que serviram de base para a elaboração do modelo quantitativo.

Para viabilizar a análise quantitativa a partir das mesmas premissas do estudo qualitativo, isto é, utilizando-se as mesmas frequências de falha para os cenários intolerantes, foi necessário inferir um valor para os MTTF que fosse representativo para o intervalo da categoria de frequência, visto que originalmente estes estavam divididos por faixas na Tabela 2.1. A Tabela 4.1 apresenta os valores arbitrados e convertidos em MTTF através da equação 2.21 e que foram utilizados no modelo por Árvore de Falhas (FTA).

Tabela 4.1 – Categorias de frequência para a FTA.

Categoria	Descrição	Falhas por hora	MTTF (Horas)
A	Extremamente Remoto	$\lambda > 1,14E-6$	1,05E+06
B	Remoto	$5,71E-6 < \lambda < 1,14E-6$	5,26E+05
C	Provável	$1,14E-4 < \lambda < 5,71E-6$	8,76E+04
D	Frequente	$\lambda < 1,14E-4$	4,38E+03

As Tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam as funções consideradas críticas e moderadas e suas respectivas frequências convertidas em MTTF por ano e utilizadas como dados de entrada no modelo quantitativo.

4.2.1 Dados de entrada sistema de potência elétrica - SPE

A tabela 4.2 ilustra a conversão dos valores de frequência oriundos da FMECA (qualitativos) em valores quantitativos conforme Tabela 4.1 para os MTTF associados às funções do sistema de potência elétrica cuja criticidade foi definida como crítica ou moderada (não-tolerável).

Tabela 4.2 – Frequência de falha SPE P-A.

Item	Descrição da função	Risco	Frequência qualitativa	MTTF (horas)
2	Fornecer energia elétrica para pelo menos uma das bombas de carga (MB-122301A, B ou C) (SLC).	Moderado	Provável	8,76E+04
3	Suprir 480 V para o PN-514006 – <i>Utilities Switchboard</i> – a partir do PN-514001, com pelo menos um alimentador (SPE, SPH, SLC).	Moderado	Provável	8,76E+04
5	Suprir 480 V para o PN-514012 – <i>Essential Switchboard</i> , a partir do PN-514001 com pelo menos um alimentador (SPE, SPH, SLC,).	Moderado	Extremamente remoto	1,05E+06
11	Suprir 480 V para o CB-810002A/B 120VAC UPS a partir do PN-514012 (SPE).	Crítico	Extremamente remoto	1,05E+06
16	Suprir 480 V para o PN-514013 <i>Accommodation Essential</i> 480V MCC a partir do PN-514012 (SPH).	Moderado	Extremamente remoto	1,05E+06
17	Suprir 480V para o MB-UH-553501A (bomba principal – HPU Navio) a partir do PN-514013 (SPH).	Moderado	Provável	8,76E+04
18	Suprir 480 V para o MB-UH-553502 (bomba de recirculação – HPU Navio) a partir do PN-514013 (SPH).	Moderado	Provável	8,76E+04
19	Suprir 480V para o PN-514014 <i>Accommodation Essential</i> 480V MCC a partir do PN-514012 (SPH,).	Moderado	Extremamente remoto	1,05E+06
20	Suprir 480 V para o MB-UH-553501B (bomba principal – HPU Navio) a partir do PN-514014 (SPH,).	Moderado	Provável	8,76E+04
28	Suprir 480 V para o M-B-511103 bomba lift de emergência a partir do PN-514012 (SPE).	Moderado	Provável	8,76E+04
29	Suprir 120VCA para o sistema SAIS a partir da UPS 2 (CB/BT-810002A/B e SAIS) com pelo menos um banco de baterias de cada uma delas. (SPE, SLC).	Crítico	Provável	8,76E+04
30	Suprir 120VCA para o sistema SAIS a partir da UPS 4 (CB/BT-810004 A/B – SAIS) com pelo menos um banco de baterias de cada uma delas.(SPE,SLC).	Crítico	Provável	8,76E+04

Item	Descrição da função	Risco	Frequência qualitativa	MTTF (horas)
31	Suprir 120VCA para o sistema SPE a partir de ambas UPS (CB/BT-810002A/B e CB/BT-810004A/B - SPE) com pelo menos um banco de baterias de cada uma delas.	Crítico	Provável	8,76E+04

4.2.2 Dados de entrada do sistema de automação e intertravamento de segurança - SAIS

A Tabela 4.3 ilustra a conversão dos valores de frequência oriundos da FMECA (qualitativos) em valores quantitativos conforme Tabela 4.1 para os MTTF associados às funções do sistema de automação e intertravamento de segurança cuja criticidade foi definida como crítica ou moderada (não-tolerável).

Tabela 4.3 - Frequência de falha SAIS P-A.

Item	Descrição da função	Risco	Frequência qualitativa	MTTF (Horas)
2	Trânsito de Informações entre PN-552002 (CIS) e as seguintes Remotas (SPE): PN-514001;PN-552004P;PN-552004Q;PN-514006;PN-514007 PN-514008;PN-514012;PN-514013;PN-514014;PN-552004J; PN-552004K; PN-552004V;	Moderado	Extremamente remoto	1,05E+06
3	Trânsito de sinais analógicos e digitais entre os elementos iniciais e finais e seus respectivos painéis remotos (SPE): PN-514001; PN-552004P; PN-552004Q; PN-514006; PN-514007 PN-514008; PN-514012; PN-514013; PN-514014; PN-552004J PN-552004K; PN-552004V	Moderado	Frequente	4,38E+03

Item	Descrição da função	Risco	Frequência qualitativa	MTTF (Horas)
4	Trânsito de informações entre PN-552002 (CIS) e as seguintes Remotas (SPH): PN-552004M; PN-552004N; PN-552004W; PN-552004X	Moderado	Extremamente remoto	1,05E+06
5	Trânsito de sinais analógicos e digitais entre os elementos iniciais e finais e seus respectivos painéis remotos (SPH): PN-552004M; PN-552004N; PN-552004W; PN-552004X	Crítico	Frequente	4,38E+03
7	Trânsito de sinais analógicos e digitais entre os elementos iniciais e finais e seus respectivos painéis remotos (SLC): PN-552004M; PN-552004X; PN-552004W; PN-552004N; PN-552004P; PN-552004Q; PN-514006; PN-514011; PN-514012; PN-514007; PN-514008; PN-514034; PN-514035; PN-552004 ^a ; PN-552004L1	Crítico	Frequente	4,38E+03
14	Trânsito de Informações entre EGCP e os elementos iniciais e finais dos Geradores de Emergência (SPE).	Moderado	Provável	8,76E+04

4.2.3 Dados de entrada do sistema de lastro e carga - SLC

A Tabela 4.4 ilustra a conversão dos valores de frequência oriundos da FMECA (qualitativos) em valores quantitativos conforme Tabela 4.1 para os MTTF associados às funções do sistema de lastro e carga cuja criticidade foi definida como crítica ou moderada.

Tabela 4.4 – Frequência de falha SLC P-A.

ITEM	DESCRIÇÃO DA FUNÇÃO	RISCO	Frequência qualitativa	MTTF (Horas)
1	Lastrar e Deslastrar o Tq.No3C, Peak Tk Vante e Peak Tk de Ré.	Moderado	Remoto	5,26E+05

ITEM	DESCRIÇÃO DA FUNÇÃO	RISCO	Frequência qualitativa	MTTF (Horas)
2	Transferir carga entre Tanques de Carga 5P / C / S utilizando as bombas de carga B-122301 ^a /B/C.	Moderado	Extremamente remoto	1,05E+06
3	Transferir Carga entre Tanques de Carga por gravidade (para Bombordo).	Moderado	Extremamente remoto	1,05E+06
5	Esgotar a praça de maquinas em caso de alagamento com a M-B-511103 Bomba Lift de Emergência.	Critico	Remoto	5,26E+05

4.2.4 Dados de entrada sistema de potência hidráulica - SPH

A Tabela 4.5 ilustra a conversão dos valores de frequência oriundos da FMECA (qualitativos) em valores quantitativos conforme Tabela 4.1 para os MTTF associados às funções do sistema de potência hidráulica cuja criticidade foi definida como crítica ou moderada (não-tolerável).

Tabela 4.5 – Frequência de falha SPH P-A.

Item	Descrição da função	Risco	Frequência qualitativa	MTTF (Horas)
1	Fornecer fluido hidráulico pressurizado a partir da UH-553501 (NAVIO) para os seguintes painéis hidráulicos: PN-553501 ^a /D; PN-553502 ^a /D; PN-553503 ^a /L.	Crítico	Provável	8,76E+04
2	Fornecer fluido hidráulico pressurizado para os seus respectivos elementos finais a partir dos seguintes painéis hidráulicos. (NAVIO): PN-553501 ^a /D; PN-553502 ^a /D; PN-553503 ^a /L.	Crítico	Provável	8,76E+04
3	Fornecer fluido hidráulico para os seus respectivos elementos finais a partir da HPU UH-533501. (LASTRO).	Moderada	Provável	8,76E+04
4	Receber e enviar sinais analógicos e digitais para ECOS.	Moderada	Provável	8,76E+04

4.3. Resultados da Análise Quantitativa

Os modelos quantitativos por árvore de falhas para cada um dos quatro sistemas analisados a partir da análise qualitativa de FMECA e conforme as premissas e dados de entrada adotados estão disponíveis no apêndice B desta dissertação.

Nas próximas seções são apresentados os resultados das confiabilidades funcionais estimadas para o tempo arbitrado de missão de $t = 8760$ horas para cada um dos sistemas da plataforma FPSO P-A, as curvas exponenciais da função confiabilidade ao longo do tempo e a avaliação dos resultados através do cálculo dos limites de confiança estatísticos.

4.3.1 Sistema de potência elétrica SPE P-A

O primeiro sistema modelado foi o sistema de potência elétrica, onde a confiabilidade funcional para o tempo de missão arbitrado foi de $R(t = 8760 \text{ h}) = 0,6676$, ou seja, 66,76%. Do ponto de vista da segurança operacional relacionada ao estudo, este número é baixo e significa que a probabilidade de ocorrência de falhas funcionais no SPE no período de um ano e que podem comprometer a capacidade de restauração da condição de equilíbrio da plataforma num cenário de emergência é de 33,24%. Ações devem ser tomadas para melhorar o desempenho deste sistema e aumentar a sua confiabilidade funcional. Estas ações devem considerar a utilização de componentes mais robustos e a implantação de redundâncias no sistema onde viável.

A Figura 4.1 ilustra o comportamento da função confiabilidade ao longo do tempo de missão para o sistema SPE.

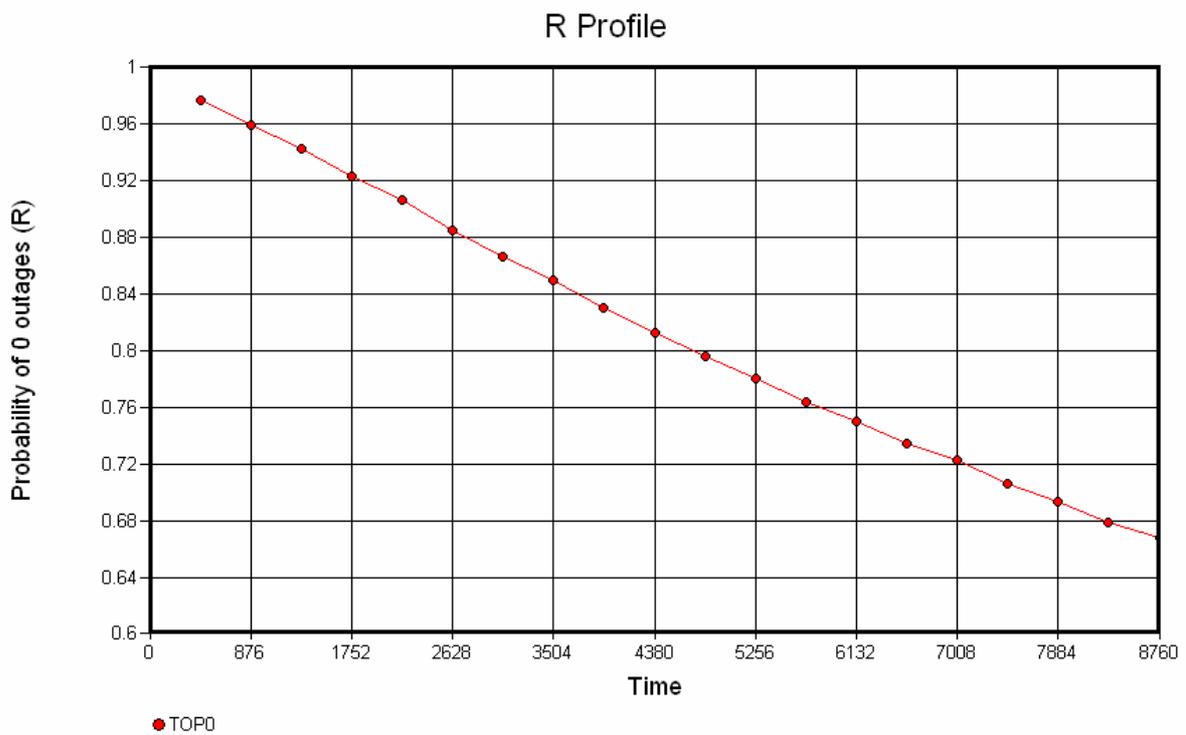


Figura 4.1 – Função confiabilidade versus tempo, SPE P-A.

A síntese dos resultados modelados para o SPE é apresentada na Tabela 4.6:

Tabela 4.6 – Resultados FTA SPE

Números de falhas esperadas, r	0, 4026
Confiabilidade, $R(t)$	0, 6676
MTTF sistema, θ	7187

Aplicando a equação 2.22 aos resultados da modelagem por árvore de falhas apresentados na Tabela 4.6 onde o tempo de simulação foi definido como $t = 8760$ horas, poderemos avaliar os resultados obtidos em função de seus limites de confiança.

Para um limite de confiança de 90%, significa dizer que o valor verdadeiro do MTTF do sistema calculado através da árvore de falhas para um $T = 8760$ horas, estará compreendido nos limites calculados por (2.22) com 90% de certeza e um erro de 10%.

Aplicando (2.22) aos resultados do SPE apresentados na Tabela 4.6, temos a equação 4.1:

Limite de Confiança desejado: 90%

$$\alpha: 1 - 0,90 = 0,10.$$

$$T = 8760 \text{ h}$$

$$r = 0,4026.$$

Os pontos da tabela $\chi^2_{(\alpha/2; 2r+2)}$ e $\chi^2_{(1 - \alpha/2; 2r)}$

$$\alpha / 2 = 0,10/2 = 0,05$$

$$1 - (\alpha / 2) = 1 - 0,05 = 0,95$$

$$2r+2 = 2,8. \text{ Deve-se usar o valor mais próximo, } 3.$$

$$2r = 0,8. \text{ Deve-se usar o valor mais próximo, } 1.$$

Logo os pontos a serem inseridos na equação 4.1 são $\chi^2_{(0,05; 3)}$ e $\chi^2_{(0,95; 1)}$.

$$\frac{2(8760)}{\chi^2_{(0,05;3)}} \leq \theta \leq \frac{2(8760)}{\chi^2_{(0,95;1)}} \quad (4.1)$$

Os valores de $\chi^2_{(0,05;3)}$ e $\chi^2_{(0,95;1)}$ são oriundos das tabelas da distribuição χ^2 disponíveis em O'CONNOR (2002).

$$\text{Onde } \chi^2_{(0,05;3)} = 7.815$$

$$\chi^2_{(0,95;1)} = 0.0158$$

Substituindo os valores tabelados na equação 4.1 obtemos a equação 4.2:

$$\frac{2(8760)}{7.815} \leq \theta \leq \frac{2(8760)}{0.0158} \quad (4.2)$$

O valor verdadeiro do MTTF do sistema SPE, com 90% de confiança, estará compreendido entre os seguintes valores:

$$2242h \leq \theta \leq 1108860h$$

O valor estimado pela simulação por árvore de falhas para o MTTF do sistema SPE e apresentado na Tabela 4.6, foi de 7187 horas.

$$2242h \leq 7187 \leq 1108860h$$

Verificou-se então que o valor calculado para o MTTF do sistema SPE encontra-se dentro do intervalo de confiança para o valor verdadeiro do parâmetro com uma certeza estatística de 90%. Isso significa dizer que para 90% das vezes onde a simulação for realizada utilizando-se a mesma lógica e os mesmos dados, o valor verdadeiro do parâmetro MTTF estará contido no intervalo de confiança.

4.3.2 Sistema de automação e intertravamento de segurança SAIS P-A

O segundo sistema modelado foi o sistema de automação e intertravamento de segurança, onde a confiabilidade funcional para o tempo de missão arbitrado foi de apenas

de $R(t = 8760 \text{ h}) = 0,0028$, ou seja, $0,28\%$. Do ponto de vista da segurança operacional relacionada ao estudo, este número significa que a probabilidade de ocorrência de falhas funcionais no SAIS no período de um ano e que podem comprometer a capacidade de restauração da condição de equilíbrio da plataforma num cenário de emergência é de $99,72\%$, o que praticamente inviabilizaria a remediação da emergência. Ações devem ser tomadas para melhorar o desempenho deste sistema e aumentar a sua confiabilidade funcional. Neste caso, o projeto do SAIS em si deve ser reavaliado. Devem ser considerados a utilização de componentes mais robustos e a implantação de redundâncias onde viável.

A Figura 4.2 ilustra o comportamento da função confiabilidade ao longo do tempo de missão para o sistema SAIS.

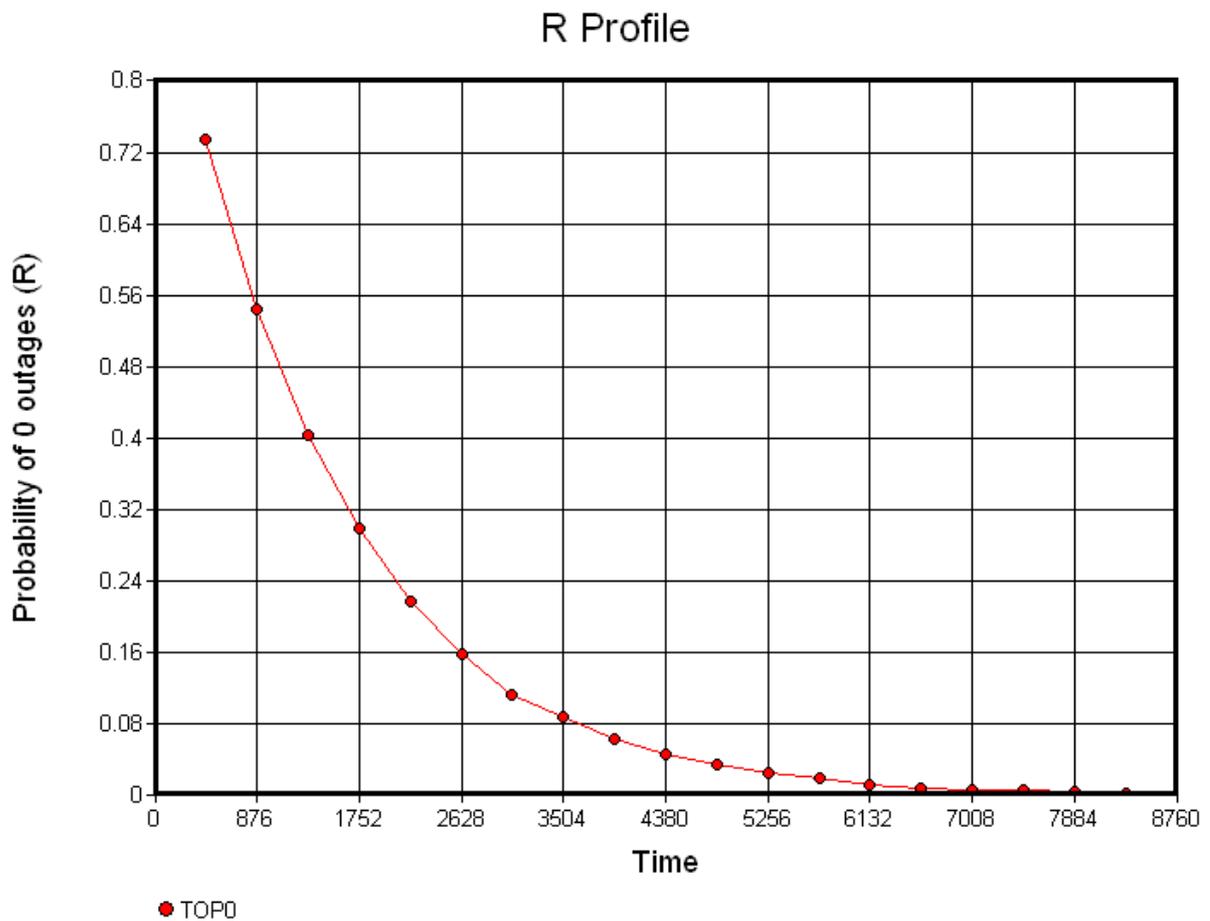


Figura 4.2 – Função confiabilidade versus tempo, SAIS P-A.

A síntese dos resultados modelados para o SAIS é apresentada na Tabela 4.7:

Tabela 4.7 – Resultados FTA SAIS

Números de falhas esperadas, r	6,14
Confiabilidade, $R(t)$	0,0028
MTTF sistema, θ	1430

Aplicando (2.22) aos resultados do SAIS apresentados na Tabela 4.7, temos a equação 4.3:

Limite de Confiança desejado: 90 %

$$\alpha: 1 - 0,90 = 0,10.$$

$$T = 8760 \text{ h}$$

$$r = 6,14$$

Os pontos da tabela $\chi^2_{(\alpha/2; 2r+2)}$ e $\chi^2_{(1 - \alpha/2; 2r)}$

$$\alpha / 2 = 0,10/2 = 0,05$$

$$1 - (\alpha / 2) = 1 - 0,05 = 0,95$$

$2r+2 = 14,2$. Deve-se usar o valor mais próximo, 14.

$2r = 12,2$. Deve-se usar o valor mais próximo, 12.

Logo os pontos a serem inseridos na equação 4.3 são $\chi^2_{(0,05; 14)}$ e $\chi^2_{(0,95; 12)}$:

$$\frac{2(8760)}{\chi^2_{(0,05;14)}} \leq \theta \leq \frac{2(8760)}{\chi^2_{(0,95;12)}} \quad (4.3)$$

Os valores de $\chi^2_{(0,05;14)}$ e $\chi^2_{(0,95;12)}$ são oriundos das tabelas da distribuição χ^2 disponíveis no O'CONNOR (2002).

Onde $\chi^2_{(0,05;14)} = 23.685$

$$\chi^2_{(0,95;12)} = 5.226$$

Substituindo os valores tabelados na equação 4.3 temos a equação 4.4:

$$\frac{2(8760)}{23.685} \leq \theta \leq \frac{2(8760)}{5.226} \quad (4.4)$$

O valor verdadeiro do MTTF do sistema SAIS, com 90% de confiança, estará compreendido entre os seguintes valores:

$$739h \leq \theta \leq 3352h$$

O valor estimado pela simulação por árvore de falhas para o MTTF do sistema SAIS e apresentado na Tabela 4.7, foi de 1430 horas.

$$739h \leq 1430 \leq 3352h$$

Verificou-se então que o valor calculado para o MTTF do sistema SAIS encontra-se dentro do intervalo de confiança para o valor verdadeiro do parâmetro com uma certeza estatística de 90%. Isso significa dizer que para 90% das vezes onde a simulação for realizada utilizando-se a mesma lógica e os mesmos dados, o valor verdadeiro do parâmetro MTTF estará contido no intervalo de confiança.

4.3.3 Sistema de lastro e carga SLC P-A

O terceiro sistema modelado foi o sistema de lastro e carga, onde a confiabilidade funcional para o tempo de missão arbitrado foi de $R(t = 8760 \text{ h}) = 0,9649$, ou seja, 96,49%. Do ponto de vista da segurança operacional relacionada ao estudo, este número é razoável e significa que a probabilidade de ocorrência de falhas funcionais no SLC no período de um ano e que podem comprometer a capacidade de restauração da condição de equilíbrio da plataforma num cenário de emergência é de 3,5%. Ações podem ser tomadas para melhorar o desempenho deste sistema e aumentar a sua confiabilidade. Estas devem

considerar a utilização de componentes mais robustos e a implantação de redundâncias onde viável.

A Figura 4.3 ilustra o comportamento da função confiabilidade ao longo do tempo de missão para o sistema SLC.

AvSim+ V10.0

03-10-00

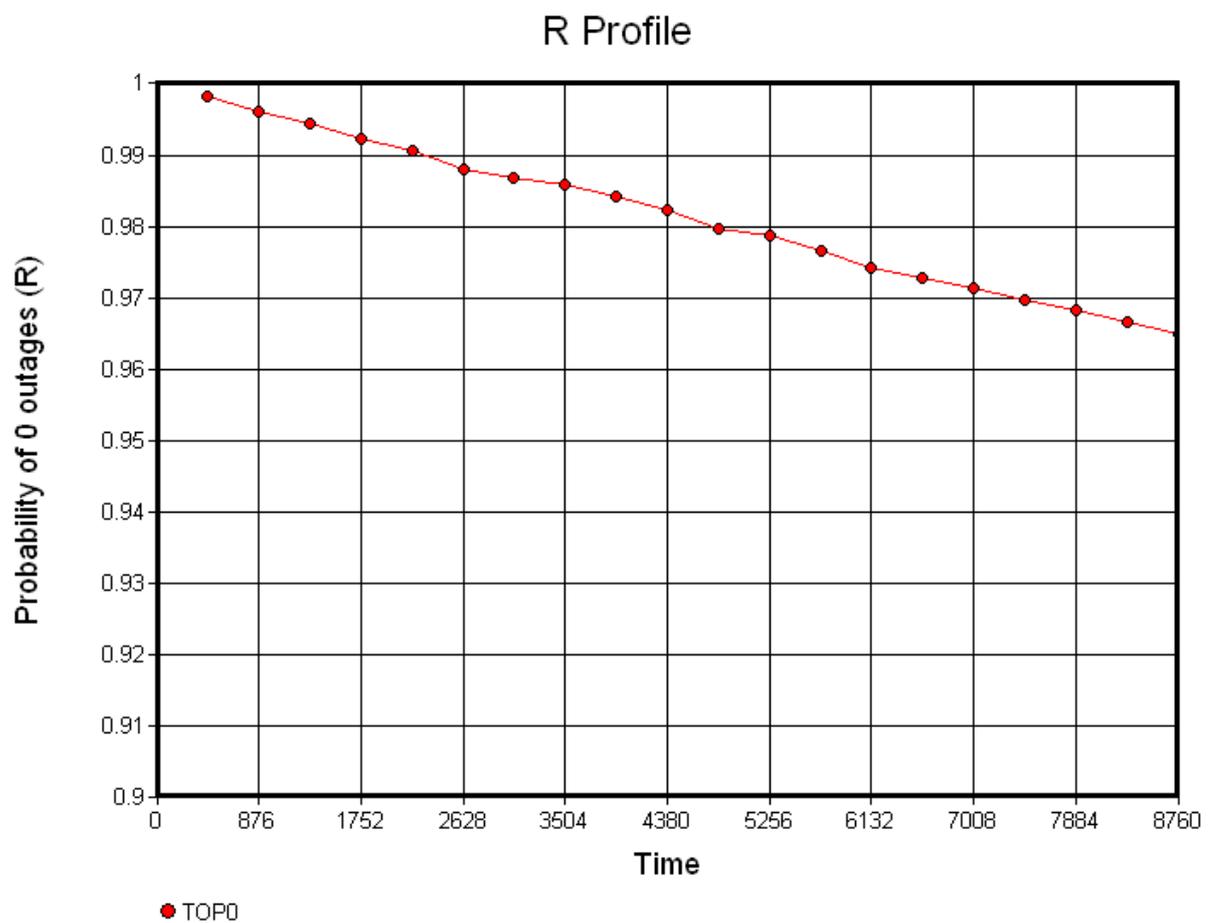


Figura 4.3 – Função confiabilidade versus tempo, SLC P-A.

A síntese dos resultados modelados para o SLC é apresentada na Tabela 4.8:

Tabela 4.8 – Resultados FTA SLC

Números de falhas esperadas, r	0,03
Confiabilidade, R(t)	0,9649
MTTF sistema, θ	8602

Aplicando (2.23) aos resultados do SLC apresentados na Tabela 4.8, temos a equação 4.5.

Limite de Confiança desejado: 90%

$$\alpha: 1 - 0,90 = 0,10.$$

$$T = 8760 \text{ h}$$

$$r = 0,0$$

Logo o ponto $\chi^2_{(\alpha; 2)}$ a ser inserido na equação 4.5 é $\chi^2_{(0,10; 2)}$

$$\frac{2(8760)}{\chi^2(0,10;2)} \leq \theta \quad (4.5)$$

O valor de $\chi^2(0,10;2)$ é oriundo da tabela da distribuição χ^2 disponível em O'CONNOR (2002).

Onde $\chi^2(0,10;2) = 4.605$. Substituindo em (4.5), temos 4.6.

$$\frac{2(8760)}{4.605} \leq \theta \quad (4.6)$$

O valor verdadeiro do MTTF do sistema SLC, com 90% de confiança, será superior ao valor:

$$3804h \leq \theta$$

O valor estimado pela simulação por árvore de falhas para o MTTF do sistema SLC e apresentado na Tabela 4.8, foi de 8602 horas.

$$3804h \leq 8602h$$

Verificou-se então que o valor calculado para o MTTF do sistema SLC encontra-se dentro do intervalo de confiança para o valor verdadeiro do parâmetro com uma certeza estatística de 90%. Isso significa dizer que para 90% das vezes onde a simulação for realizada utilizando-se a mesma lógica e os mesmos dados, o valor verdadeiro do parâmetro MTTF estará contido no intervalo de confiança.

4.3.4 Sistema de potência hidráulica SPH P-A

O último sistema modelado foi o sistema de potência hidráulica, onde a confiabilidade funcional para o tempo de missão arbitrado foi de $R(t = 8760 \text{ h}) = 0,6714$, ou seja, 67,14%. Do ponto de vista da segurança operacional relacionada ao estudo, este número é baixo e significa que a probabilidade de ocorrência de falhas funcionais no SPH no período de um ano e que podem comprometer a capacidade de restauração da condição de equilíbrio da plataforma num cenário de emergência é de 32,86%. Ações devem ser

tomadas para melhorar o desempenho deste sistema e aumentar a sua confiabilidade. Estas devem considerar a utilização de componentes mais robustos e a implantação de redundâncias onde viável.

A Figura 4.4 ilustra o comportamento da função confiabilidade ao longo do tempo de missão para o sistema SPH.

AvSim+ V10.0

03-10-0

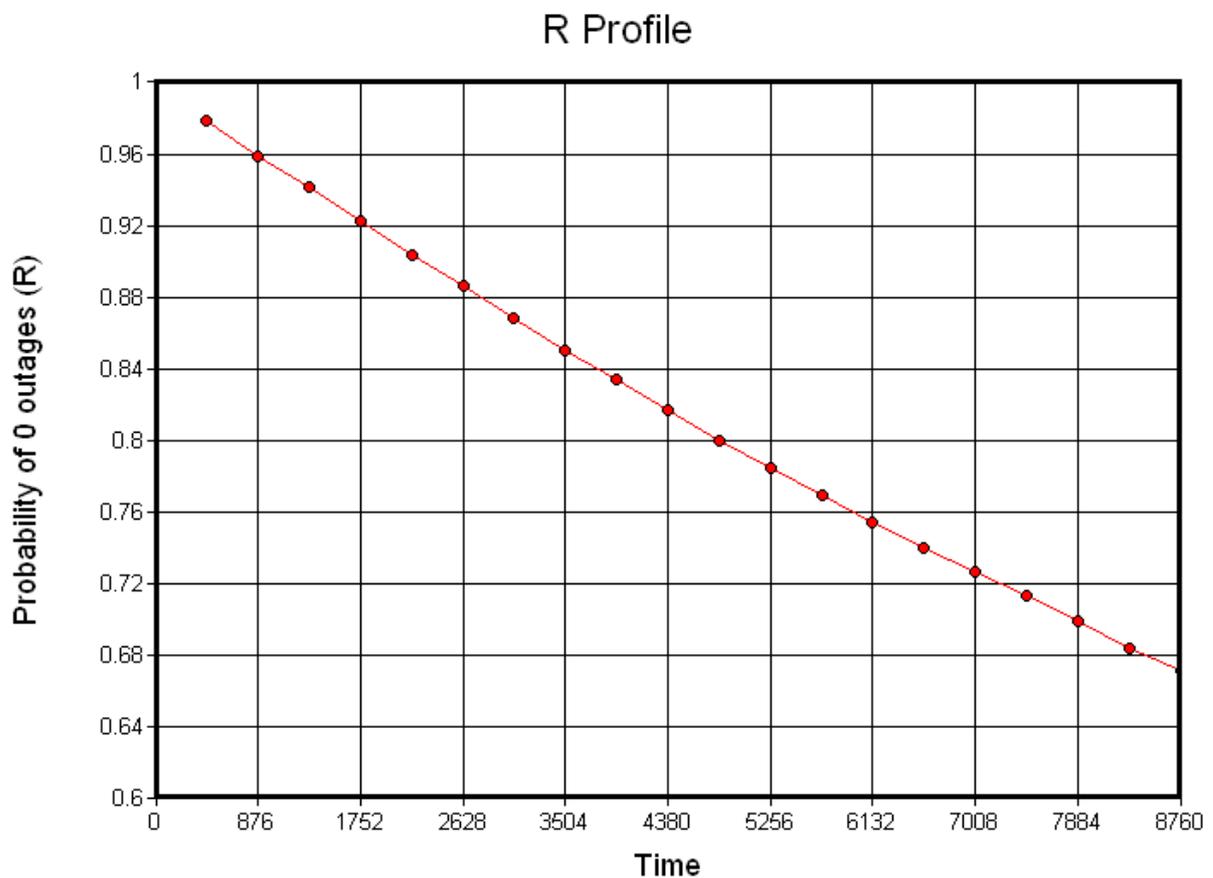


Figura 4.4 – Função confiabilidade versus tempo, SPH P-A.

A síntese dos resultados modelados para o SPH é apresentada na Tabela 4.9:

Tabela 4.9 – Resultados FTA SPH

Números de falhas esperadas, r	0,3988
Confiabilidade, R(t)	0,6714
MTTF sistema, θ	7213

Aplicando (2.22) aos resultados do SPH apresentados na Tabela 4.9, temos a equação 4.7:

Limite de Confiança desejado: 90%

$$\alpha: 1 - 0,90 = 0,10.$$

$$T = 8760 \text{ h}$$

$$r = 0,3988$$

Os pontos da tabela $\chi^2_{(\alpha/2; 2r+2)}$ e $\chi^2_{(1 - \alpha/2; 2r)}$

$$\alpha / 2 = 0,10/2 = 0,05$$

$$1 - (\alpha / 2) = 1 - 0,05 = 0,95$$

$2r+2 = 2,8$. Deve-se usar o valor mais próximo, 3.

$2r = 0,8$. Deve-se usar o valor mais próximo, 1.

Logo os pontos a serem inseridos na equação 4.1 são $\chi^2_{(0,05; 3)}$ e $\chi^2_{(0,95; 1)}$.

$$\frac{2(8760)}{\chi^2_{(0,05;3)}} \leq \theta \leq \frac{2(8760)}{\chi^2_{(0,95;1)}} \quad (4.9)$$

Os valores de $\chi^2_{(0,05;3)}$ e $\chi^2_{(0,95;1)}$ são oriundos das tabelas da distribuição χ^2 disponíveis em O'CONNOR (2002).

Onde $\chi^2(0,05;3) = 7.815$

$$\chi^2(0,95;1) = 0.0158$$

Substituindo os valores tabelados na equação 4.9, temos a equação 4.10:

$$\frac{2(8760)}{7.815} \leq \theta \leq \frac{2(8760)}{0.0158} \quad (4.10)$$

O valor verdadeiro do MTTF do sistema SPE, com 90% de confiança, estará compreendido entre os seguintes valores:

$$2242h \leq \theta \leq 1108860h$$

O valor estimado pela simulação por árvore de falhas para o MTTF do sistema SPH e apresentado na Tabela 4.9, foi de 7213 horas.

$$2242h \leq 7213 \leq 1108860h$$

Verificou então que o valor calculado para o MTTF do sistema SPH encontra-se dentro do intervalo de confiança para o valor verdadeiro do parâmetro com uma certeza estatística de 90%. Isso significa dizer que para 90% das vezes onde a simulação for realizada utilizando-se a mesma lógica e os mesmos dados, o valor verdadeiro do parâmetro MTTF estará contido no intervalo de confiança.

4.4. Estudo de Sensibilidade

O objetivo do estudo de sensibilidade é analisar os dados de entrada utilizados no modelo quantitativo da dissertação, os tempos médio para falhar (MTTF). Conforme apresentado no capítulo 4.2, Tabela 4.1, para viabilizar a modelagem, foi necessário arbitrar um valor para os MTTF que fosse representativo para cada categoria de frequência de falha visto que estes valores estavam divididos originalmente por faixas.

O estudo de sensibilidade foi composto por dois novos modelos utilizando-se a mesma estrutura lógica, ou seja, a mesma seqüência de eventos. Os dois novos modelos foram criados de acordo com os valores limites das faixas de frequência. Um modelo com os maiores MTTF e outro com os menores MTTF. A Tabela 4.10 ilustra todos os MTTF utilizados, tanto no modelo original quanto nos modelos do estudo de sensibilidade.

Tabela 4.10 - MTTF utilizados

Categorias para as Frequências de Falhas		Tempo Médio para Falhar em Horas				
		Freq. Inferior	Freq. Maior	MTTF usado	MTTF Maior	MTTF Menor
A	Extremamente remoto	< 1.14E-06	1.14E-06	1.05E+06	1.58E+06	8.77E+05
B	Remoto	1.14E-06	5.71E-06	5.26E+05	8.77E+05	1.75E+05
C	Provável	5.71E-06	1.14E-04	8.76E+04	1.75E+05	8.77E+03
D	Frequente	1.14E-04	> 1.14E-04	4.38E+03	8.77E+03	2.19E+03

Optou-se pela aplicação destes dados a árvore de falhas do sistema de automação e intertravamento de segurança (SAIS), visto que este sistema apresentou os piores resultados. A Tabela 4.11 apresenta um quadro comparativo dos resultados alcançados em pelo modelo para cada MTTF usado como dado de entrada.

A Tabela 4.11 - Quadro comparativo dos resultados

	MTTF Menor	MTTF usado	MTTF Maior
Numero de Falhas Esperadas	13,0	6,14	3,04
Confiabilidade em t=8760 h	0,0000	0,0028	0,0520
MTTF do Sistema	660 h	1430 h	2702 h

As Figuras 4.5 , 4.6 e 4.7 ilustram respectivamente os resultados para os parametros do sistema: MTTF, confiabilidade e o numero de falhas esperadas obtido em cada modelo variando-se os MTTF de entrada.

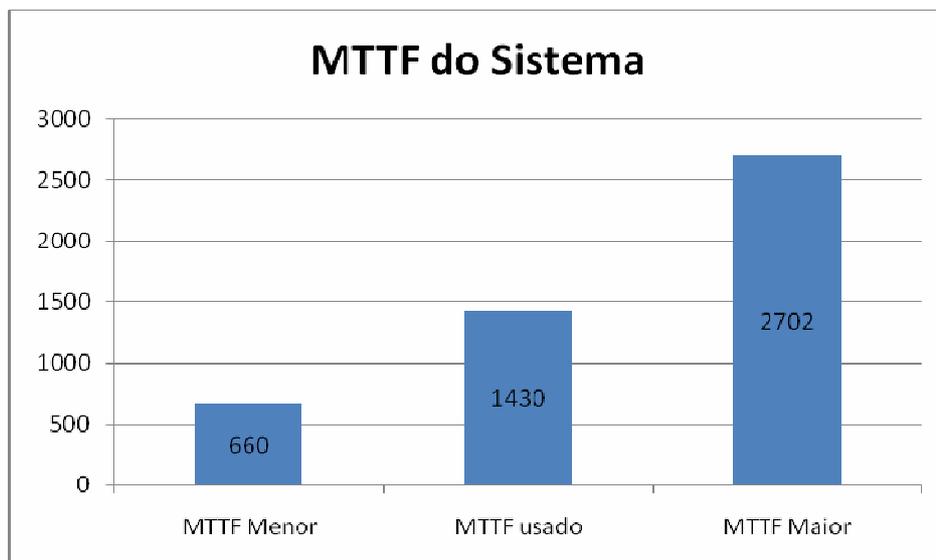


Figura 4.5 – MTTF do sistema SAIS em funcao dos MTTF de entrada.

Analisando a vida media do sistema com a alteracao desses parâmetros, percebe-se uma alteração de cerca de 50% tanto para cima (52%) quanto para baixo (46%). Utilizando-se os maiores MTTF para as funções críticas que compõem o modelo, o sistema passa a ter um MTTF de 2702 horas. Usando os menores MTTF para as funções críticas, o sistema passa a ter um MTTF de apenas 660 horas.

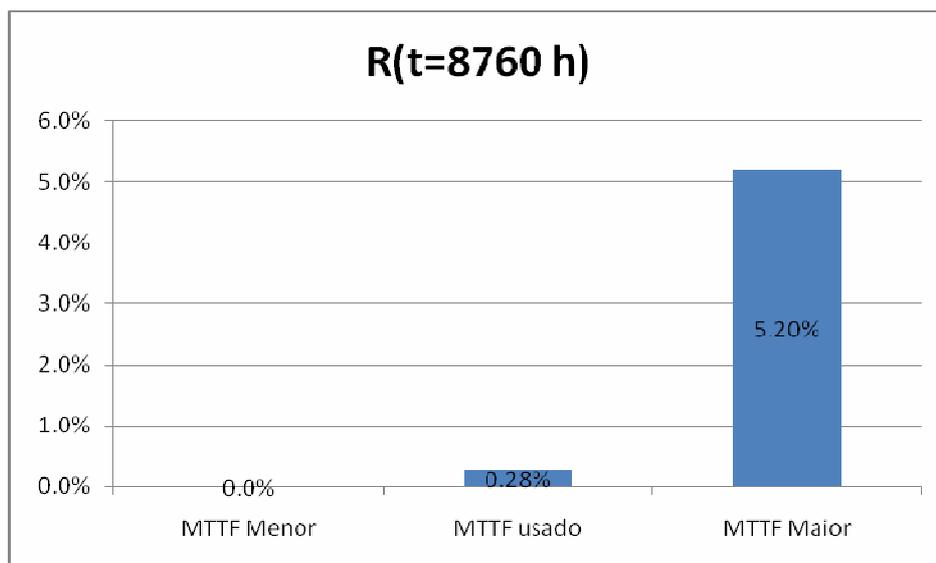


Figura 4.6 – Confiabilidade do sistema SAIS em função dos MTTF de entrada.

A confiabilidade do sistema variou pouco quando utilizado os menores MTTF para as funções básicas, pois a confiabilidade para o valor intermediário (MTTF usado) já estava próxima de zero (0,0028). Neste sentido, as chances de reversão de um cenário de emergência e recuperação da condição de equilíbrio da plataforma FPSO quanto da existência de falhas no sistema SAIS, são praticamente nulas. Por outro lado, quando utilizamos os MTTF maiores como dados de entrada do modelo, essa probabilidade aumenta pouco chegando a 5,2%.

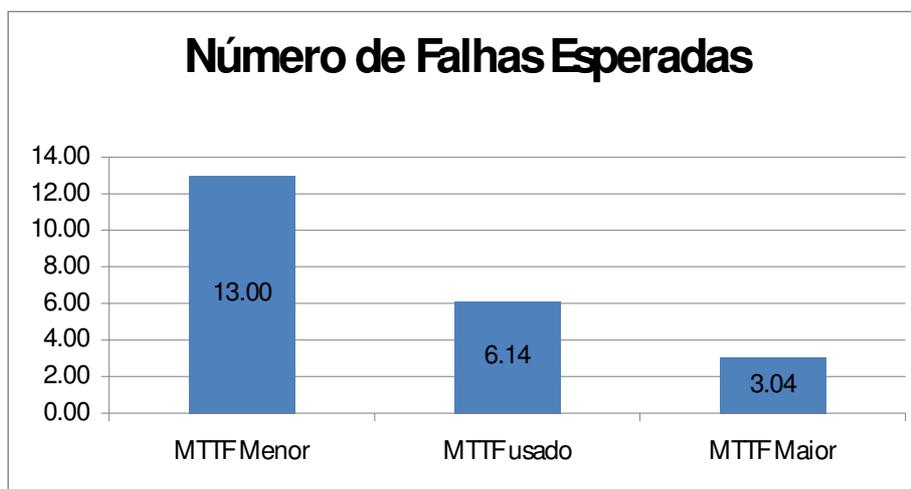


Figura 4.7– Número de falhas esperadas do sistema SAIS .

A quantidade de falhas esperadas para o sistema também ficou distribuída mais ou menos simetricamente entorno do valor usado na dissertação. Aumentando 47% para os menores MTTF e diminuindo 49,5% para os MTTF maiores.

Verificou-se que os valores utilizados no modelo de arvore de falhas do sistema SPA com dados de entrada limites das faixas de probabilidade ficaram mais ou menos simetricamente distribuídos entorno dos valores da Tabela 4.1. Com relação aos parâmetros do sistema, vida media (MTTF) e numero de falhas esperadas, a variação dos resultados foi significativa, sendo da ordem de 50%. Isso significa que o desempenho do sistema em relação a estes parâmetros pode melhorar ou piorar de acordo com a adoção de um dos limites da faixa de probabilidade como dado de entrada. Para o parâmetro confiabilidade funcional a variação numérica foi pouco representativa com um incremento de cerca de apenas 5.0% quando adotados os melhores MTTF, o que representa a quase total incapacidade de reversão da condição de equilíbrio da unidade num cenário de emergência caso ocorra uma falha funcional crítica ou moderada durante o processo.

4.5. Considerações finais – FTA

Os resultados estimados para a confiabilidade funcional de cada sistema são sumarizados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Confiabilidade calculada por sistema.

Sistema Analisado	R (t=8760 h)
Sistema SPE	66,76 %
Sistema SAIS	0,28 %
Sistema SLC	96,28 %
Sistema SPH	67,14 %

Os valores alcançados pelos modelos quantitativos foram baixos, sobretudo do ponto de vista da segurança operacional e da possibilidade de reversão da condição de equilíbrio da unidade num cenário de emergência.

A modelagem quantitativa por árvore de falhas a partir dos resultados da FMECA utilizou como dado de entrada as taxas de falha definidas pelos especialistas da unidade. Isso ocorreu devido à indisponibilidade de dados reais acerca das falhas dos componentes que compõem os sistemas analisados durante a elaboração da FMECA desta unidade e a estrutura funcional da análise de riscos que inviabilizou o uso de dados bancos internacionais tais como em OREDA (2002). Estes dados estimados pelos especialistas viabilizaram a construção do modelo quantitativo e a estimação da confiabilidade funcional e do MTTF dos sistemas. Os valores altos para as taxa de falha definidas pela equipe de

especialistas os quais foram baseadas na ET-3000.00-5400-983-PAK-001 (2004), da Petrobras fizeram com que as confiabilidades funcionais calculadas fossem baixas.

O método proposto por BROOME (1990) possibilitou a verificação dos valores calculados para o MTTF de cada sistema do ponto de vista dos limites de confiança. Para todos os sistemas, os valores modelados apesar de baixos encontraram-se dentro dos limites para o verdadeiro valor do MTTF com 90% de certeza.

Apesar dos valores calculados tanto para a confiabilidade funcional quanto para os MTTF serem baixos e próximos aos limites inferiores dos intervalos de confiança, os resultados modelados servem para ilustrar a limitação dos esforços de recuperação da condição de equilíbrio da plataforma caso ocorram falhas funcionais críticas ou moderadas em qualquer um destes sistemas durante um processo de tratamento da emergência.

Neste contexto, devem-se priorizar as ações relativas ao sistema de automação e intertravamento de segurança da unidade marítima de produção FPSO P-A perante aos demais sistemas analisados. Deve-se re-analisar o projeto do sistema SAIS e a contribuição de cada equipamento que compõe mesmo e que refletiu a percepção da equipe de especialistas que participaram das análises de riscos qualitativas que deram origem a esta dissertação. Esta análise deve contemplar os componentes mais suscetíveis a falhas e que são necessários ao cumprimento das funções identificadas, trocando-os por componentes mais robustos quando possível. Além disso, a introdução de arranjos de componentes em paralelo, redundâncias, também contribui para aumentar a confiabilidade do sistema.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo desta dissertação foi apresentar um caso prático de aplicação para a utilização dos resultados de uma análise qualitativa de riscos através da metodologia da FMECA em um estudo quantitativo de confiabilidade funcional por árvore de falhas. Para atingir este objetivo, utilizou-se a FMECA da plataforma FPSO P-A.

Este último capítulo contempla as conclusões sobre a metodologia aplicada para a conversão dos resultados da FMECA em dados de entrada da análise quantitativa de confiabilidade funcional seguindo as premissas da ET-3000.00-5400-983-PAK-001 (2004). Além das conclusões, são abordadas também as recomendações sobre a metodologia aplicada e o uso de técnicas complementares que podem melhorar a qualidade dos resultados obtidos.

5.1 Conclusões

5.1.1 Conclusões análise qualitativa - FMECA

A análise qualitativa teve um papel importante na definição das funções e na avaliação da criticidade das mesmas, as quais serviram como critério para a elaboração do estudo de confiabilidade funcional. Além disso, espera-se uma melhora do desempenho dos sistemas em termos de segurança operacional após a implementação das ações definidas durante a FMECA. De uma forma geral, as recomendações e observações geradas nesta fase contemplaram as duas dimensões do risco, a frequência da perda de uma função e a severidade em caso de ocorrência da mesma.

Para os cenários cuja dimensão dominante está associada à alta frequência de falha, as seguintes ações podem ser adotadas:

1. Ações rotineiras de inspeção e manutenção usando técnicas apropriadas podem atenuar o risco através da diminuição da quantidade de falhas esperadas;
2. Reprojeto de alguns componentes críticos cuja confiabilidade intrínseca seja baixa. A troca por componentes mais robustos também diminuirá a quantidade de falhas ao longo do tempo de missão aumentando a confiabilidade dos mesmos;
3. Adoção de dispositivos à prova de erros que evitem respostas humanas negativas e que agravem o cenário do acidente;
4. Treinamento e capacitação dos operadores e equipes de manutenção/inspeção;
5. Adoção de procedimentos documentados e auditáveis.

Para os cenários cuja dimensão dominante está associada à alta severidade, as seguintes medidas podem ser adotadas:

1. Ações de reprojeto que aumentem a confiabilidade do sistema tais como o uso de redundâncias;
2. A adoção de equipamentos de diferentes tecnologias e/ou fabricantes diminuindo assim a chance de falhas de causa comum (conceito de diversidade);
3. Utilização de dispositivos de segurança (atenuação e salvaguarda);
4. Adoção de sistemas de alerta locais que aumentem a possibilidade de resposta humana positiva, tais como alarmes visuais e sonoros.
5. Treinamento e capacitação dos operadores e equipes de manutenção/inspeção;
6. Adoção de procedimentos documentados e auditáveis.

Em muitos casos, ambas as dimensões contribuíram igualmente para o risco, e nestes casos, ambos os conjunto de ações são aplicáveis.

O estudo de FMECA permitiu ainda uma releitura da unidade através de documentos de projeto e operação, do ponto de vista da interface entre os sistemas estudados. Este exercício aprofundou o conhecimento global das equipes envolvidas nos estudos sobre o funcionamento destes sistemas e dessas unidades.

A análise serviu de cenário para que os especialistas da Petrobras de diferentes disciplinas pudessem juntos discutir e classificar os riscos para a perda da estabilidade considerando tanto a frequência de eventos indesejados quanto a severidade dos mesmos.

Esta análise documentada permitirá um acompanhamento dinâmico das tarefas relacionadas (planos de ação, auditorias e *follow ups*), facilitando assim a implantação das ações e a tomada de decisões gerenciais.

5.1.2 Conclusões análise quantitativa - FTA

A modelagem da confiabilidade dos sistemas críticos e moderados a partir da FMECA da unidade marítima de produção FPSO P-A utilizando-se os dados de falha oriundos da ET-3000.00-5400-983-PAK-001 (2004), como dados de entrada do modelo, apesar de não gerarem bons resultados em termos de Confiabilidade funcional e MTTF para o tempo de missão arbitrado ($t = 8760$ h), mostrou-se uma importante ferramenta para a avaliação da segurança operacional da unidade. O objetivo foi quantificar a percepção da equipe de especialistas quanto à probabilidade de ocorrência da perda da função analisada que, em última análise, pudesse influenciar na recuperação da condição de equilíbrio da plataforma em um cenário de emergência.

Devido às inferências envolvidas nos processos de escolha das frequências de falha na fase de análise qualitativa onde se usou uma tabela genérica, Tabela 2.1, para se arbitrar

os tempos médios entre falhas de cada cenário estudado e o processo de conversão desses valores para viabilizar o modelo quantitativo, foi necessário a elaboração de um estudo de sensibilidade para avaliação dos dados de entrada dos modelos. O resultado desta análise demonstrou que para o parâmetro confiabilidade funcional, a variação nos resultados alcançados pelo sistema SAIS com a adoção dos valores limites de frequência de falha como dado de entrada foi pouco significativo.

Ainda assim, os resultados alcançados contribuíram significativamente para evidenciar que o sistema mais crítico foi o sistema de automação e intertravamento de segurança, o SAIS, com apenas 0,28 % de chances de recuperação da condição de equilíbrio da unidade, em um cenário de emergência, caso ocorra uma ou mais falhas funcionais neste sistema durante o tempo de missão simulado.

5.2 Recomendações

Para as unidades flutuantes de produções analisadas conforme a ET-3000.00-5400-983-PAK-001 (2004), é recomendável repetir a análise quantitativa algum tempo após a implantação das ações recomendadas na fase de análise de riscos qualitativa para que se possa mensurar o ganho na confiabilidade do sistema.

Para a obtenção de melhores estimativas dos tempos médios para falhar dos equipamentos e funções identificados nos estudos referentes aos sistemas de potência elétrica, automação e intertravamento de segurança, lastro e carga e potencia hidráulica da unidade fictícia FPSO P-A, recomenda-se que a análise de riscos por FMECA seja quantitativa. Segundo a norma MIL STD 1629 (1980), é possível já na fase de análise de

riscos utilizarem-se dados reais de falha ou dados provenientes de banco de dados específicos como em OREDA (2002), ao invés de dados genéricos tabelados.

A análise de criticidade quantitativa leva em consideração além das taxas de falha ou das probabilidades de falha, a relação de cada modo de falha e a probabilidade de perda da função. O cálculo é feito conforme a equação 5.1

$$Cm = F(t) * \alpha * \beta \quad (5.1)$$

Onde:

Cm – Criticidade do modo de falha.

$F(t)$ – É probabilidade de falha de cada modo de falha. Pode ser calculado com base no levantamento de dados de vida dos equipamentos, no histórico de manutenção da própria unidade, em dados de unidades similares ou oriundos de bancos de dados de falhas comerciais tais como em OREDA (2002).

α – É relação do modo de falha. É a proporção de um determinado modo de falha x sobre o total de modo de falhas associados a uma função. Representa a frequência de cada modo de falha. $\alpha_x = \frac{\text{Número de ocorrências do modo de falhas } x}{\text{Total de ocorrências considerando-se todos os modos de falhas}}$

β – É a probabilidade de perda da função. É a probabilidade condicional de que o efeito associado de sua falha levará à perda da função identificada. É o parâmetro para avaliar qual o modo de falha mais crítico. Para auxiliar na sua determinação, a MIL STD 1629 (1980), contempla uma Tabela de referência, apresentada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores de referencia para a estimação de β .

Efeitos das Falhas	Valores de β
Perda Real	1.00
Perda provável	> 0.10 até < 1.00
Perda Possível	> 0 até = 0.10
Sem efeito	0

Depois de calculada a criticidade de cada modo de falha associado a cada função, a criticidade da função é calculada de acordo com a equação 5.2.

$$C_r = \sum C_m \quad (5.2)$$

Desta forma, a avaliação das criticidades para as funções identificadas que antes foi realizada de forma subjetiva e baseada apenas na experiência dos especialistas, passaria a ser feita com base em dados reais.

Esta nova abordagem permitiria que os cenários identificados como críticos e moderados e considerados intoleráveis segundo a ET-3000.00-5400-983-PAK-001 (2004), fossem modelados através da técnica de árvore de falhas com dados de entrada reais e não estimados. As probabilidades de falha poderiam ser facilmente convertidas em tempos médios até a falha.

Os resultados das funções confiabilidade estimados seriam mais precisos, podendo ser considerados de forma absoluta e não apenas de forma relativa. As tomadas de decisão para aumentar a confiabilidade dos sistemas em termos de segurança seriam mais específicas e menos genéricas.

Outra recomendação importante refere-se ao sistema de automação e intertravamento de segurança, o qual apresentou a menor confiabilidade dentre os sistemas avaliados. Para este sistema seria interessante realizar uma análise dos níveis de integridade de segurança de seus componentes (análise SIL – *Safety Integrity Level*).

De acordo com a norma N-2782 (2005), esta técnica permite avaliar os níveis de segurança estabelecidos para definir requisitos de integridade de sistemas de segurança alocado ao sistema de instrumentação de segurança, sendo um indicador de desempenho do sistema instrumentado de Segurança. É possível avaliar o nível de criticidade das malhas de segurança de um determinado processo tanto qualitativamente quanto quantitativamente.

A Petrobras possui uma norma específica com critérios de projeto e manutenção para sistemas instrumentados de segurança, a N-2595 (1997), que tem sido usada como referencia em estudos qualitativos.

Estudos de SIL quantitativos podem ainda ser feitos com base na norma IEC 61511 (2002).

REFERÊNCIAS

API BRD 581(2000): *Risk-based inspection base resource document*, American Petroleum Institute, First edition, EUA.

ASCHER, Harold; FEINGOLD, Harry. *Repairable systems reliability: modeling, inference, misconception and their causes*. CRC, EUA, 1984.

BARNET, J. Wesley. *Statistical analysis for engineers and scientists: a computer-based approach*. New York: McGraw-Hill Companies, 1994.

BROOME, Huge; et al. *Introduction to Reliability Engineering*. American Society for Quality, 1990.

ELSAYED, Elsayed A. *Reliability engineering*. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

ET-3000.00-5400-983-PAK-001 (2005): *Análises qualitativas de Risco e de Confiabilidade das interações entre os sistemas de potência elétrica e de automação, de forma a avaliar possíveis seqüências de eventos que pudessem levar às unidades marítimas flutuantes de produção à perda de estabilidade*, Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil.

FRUTUOSO E MELO, Paulo Fernando F. *Introdução à confiabilidade – Notas de aula do curso de mestrado em Engenharia Nuclear , COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006*.

HAHN, Gerald J.; SHAPIRO; Samuel S. *Statistical models in engineering* Los Angeles 1994.

IEC 61511(2002): *Functional safety - safety instrumented systems for the process industry sector*. International Electrotechnical Commission, Suíça.

I-ET-3000.00-5400.947-PCI-001(2006): *Maritime production installation safety philosophy*. Rev. C. Petrobras, 2006.

IMO MODU (2001): *The Code for the Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units*, International Maritime Organization, London.

IRESON, William Grant; COOMBS; Clyde F.; MOSS, Richard Y. *Handbook of reliability engineering and management*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Professional, 1995.

KECECIOGLU, Dimitri. *Maintainability, availability and operational readiness engineering handbook*. EUA, 1995.

KECECIOGLU, Dimitri. *Reliability and life testing handbook*. New Jersey: Prentice Hall, 1993.

KECECIOGLU, Dimitri. *Reliability engineering handbook*. New Jersey: Prentice Hall, 1991.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro: Quality Mark, 2001.

LAPPONI, J. C. *Estatística usando Excel*. São Paulo: Lapponi Treinamento e Editora, 2000.

LAWLESS, J. F.; LAWLESS, Jerald T. *Statistical models and methods for lifetime data*. 2nd ed. New York: Wiley, 2002.

LEEMIS, Lawrence M. *Reliability: probabilistic models and statistical methods*. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

- LLOYD, David K.; LIPOW Myron. *Reliability: management, methods and mathematics* 2nd ed. American Society for Quality, 1984.
- MANN, Nancy R.; SCHAFER, Ray E.; et al. *Methods for statistical analysis of reliability and life data*. London: John Wiley & Sons, 1974.
- MEEKER, William K.; ESCOBAR, Luis A. *Statistical methods for reliability data*. Hoboken: Wiley-Interscience, 1998.
- MIL-STD-1629 A (1980): *Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis*, Department of Defense, EUA
- MONTEIRO et al. *Metodologia para análise de risco/confiabilidade da interação entre os sistemas de potência elétrica e de automação em plataformas de produção*. 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Salvador, Outubro de 2005.
- MOUBRAY, John. *Reliability-centered maintenance*. 2nd ed. Boston: Butterworth–Heinemann, 1999.
- N-2595 (1997): *Critérios de projeto e manutenção para sistemas instrumentados de segurança em unidades industriais*. Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil.
- N-2782 (2005): *Critérios para aplicação de técnicas de avaliação de riscos*. Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil.
- N-2784 (2005): *Confiabilidade e análise de riscos – terminologia*. Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil.
- NBR 5462 (1994): *Confiabilidade e manutenibilidade – terminologia*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.

- NELSON, Wayne. *Applied life data analysis*. New York: Wiley, 1982.
- NELSON, Wayne. *Recurrent-events data analysis for product repairs, disease recurrences, and other applications*. Society for Industrial Mathematics ,EUA 2003.
- NOWLAN, F. Stanley; HEAP, Howard F. *Reliability-Centered Maintenance*. Washington, DC: Department of Defense, 1978. (Report number AD-A066579).
- O`CONNOR, P. D. T. *Practical reliability engineering*. 4th ed. London: John Wiley & Sons, 2002.
- OREDA: *Offshore Reliability Databank*. 4th Edition - SINTEF Technology and Society, Noruega 2002.
- RAUSAND, M. *Reliability Theory and Methods, In: Risk and reliability in Subsea Engineering*, Notas de aula do curso de mestrado em Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- RIGDON, Steven E.; BASU, Asit P. *Statistical methods for the reliability of repairable systems*. New York: John Wiley and Sons, 2000.
- ROCHA, G. e TINOCO, M. *Inspeção Baseada em Risco*. 4º Simpósio Internacional de Confiabilidade , Salvador , Maio de 2006.
- ROCHA, G. *Using internal data collection from the field to enhance reliability results*. Subsea Rio 2004 conference, Rio de Janeiro, Maio de 2004.
- SAE JA 1012 (2002): *A guide to Reliability – Centered Maintenance (RCM)*. Society of Automotive Engineers, EUA.

SMITH, David. *Reliability, maintainability and risk*. Boston: Butterworth–Heinemann, EUA, 1997.

SMITH, P. J. *Analysis of failure and survival data*. Boca Raton: CRC Press, 2002.

SOLAS (2002): *International Convention for the Safety of Life at Sea*, International Maritime Organization, London.

TOBIAS, Paul A.; TRINDADE, David. *Applied reliability*. 2nd ed. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 1995.

VASSILIOU, Pantelis; et al. *Life Data Analysis Reference, Weibull ++ Version 6*. Reliasoft Corporation, Tucson, 2000.

APÊNDICE A

Análise de Modos e Efeitos de Falhas e sua Criticidade – FMECA										
Sistema: SAIS										
Revisão: A										
Documentos de Referência: Ver Relatório										
Função	Componentes	Modo de Falha	Frequência	Efeitos	Severidade	Detectabilidade	Resposta Humana		Risco	Cenário
							Positiva – Recuperação da Falha	Negativa		
1) Transitar informações entre as Estações da ECOS (PN-552001 A/B /C/D/E/F/G/H/J/K/L) e os CS (PN-552002): (SAIS, SPE, SLC e SPH) CS – Control Interlocking System (Sistema de Controle e Intertravamento).	a) Estações de trabalho. b) ECOS Switches A/B. c) Rede Ethernet. d) Cartões Ethernet dos PLCs (ESD, PCS, VSL, ELE, F&G).	a1) Falha simultânea nas 2 Estações de trabalho servidoras A e E. b1) Falha simultânea dos 2 ECOS Switches A/B. c1) Falha da rede Ethernet (incluindo os dois cabos). d1) Falha simultânea de 2 cartões Ethernet do mesmo PLC (ESD, PCS, VSL, ELE, F&G).	C	a1, b1, c1 e d1. - Perda da monitoração e controle humano via ECOS nos sistemas/ processos (SLC, SPH, SPE, SAIS).	I	- Estações ECOS. - Sinais visuais. (switch, cartões Ethernet).	NA	NA	NÃO CRÍTICO	1 (1a1)
										2 (1b1)
										3 (1c1)
										4 (1d1)



Diagram Report

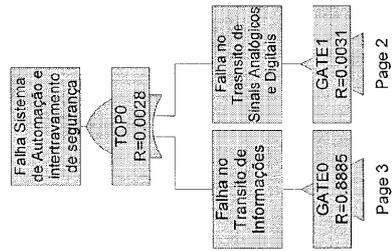




Diagram Report

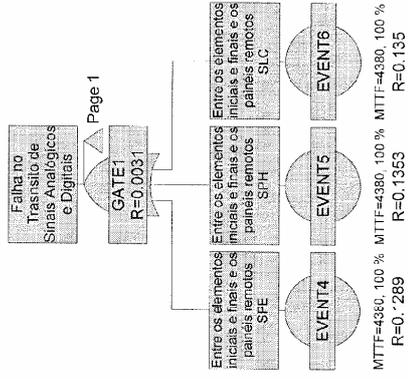




Diagram Report

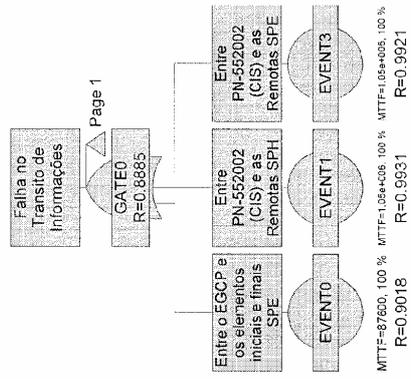




Diagram Report

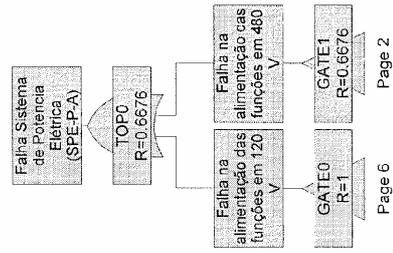




Diagram Report

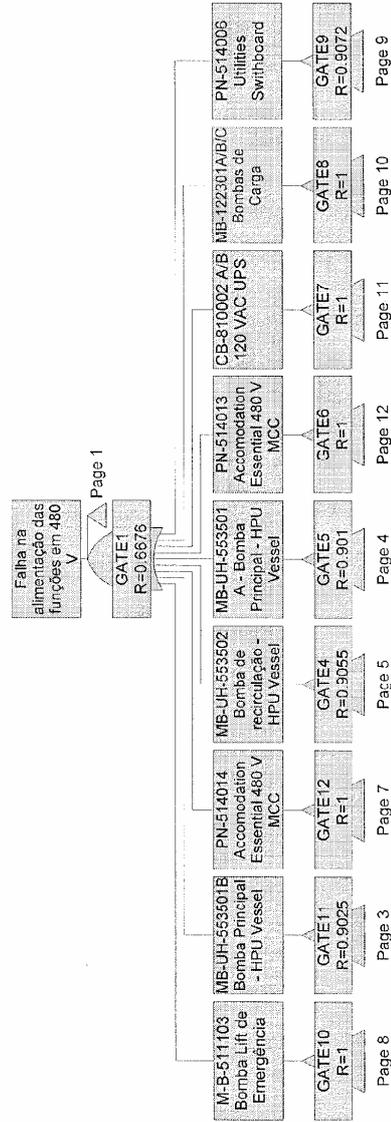




Diagram Report

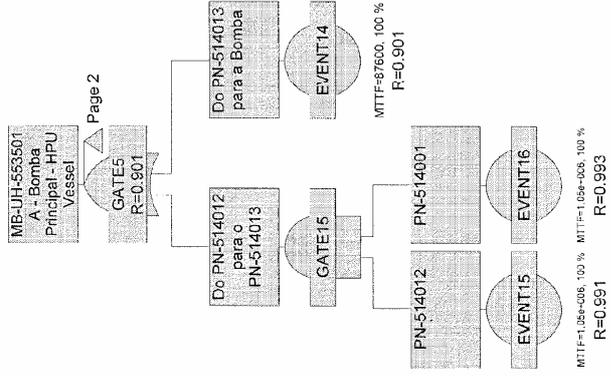




Diagram Report

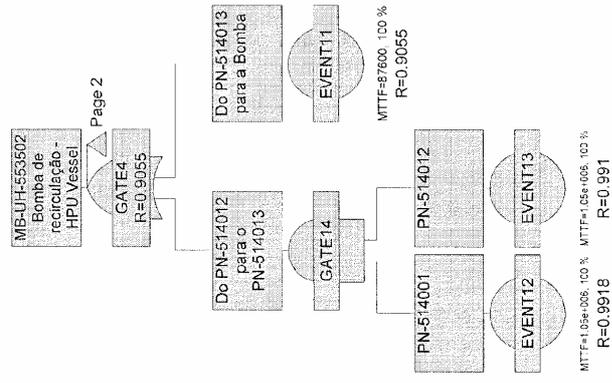




Diagram Report

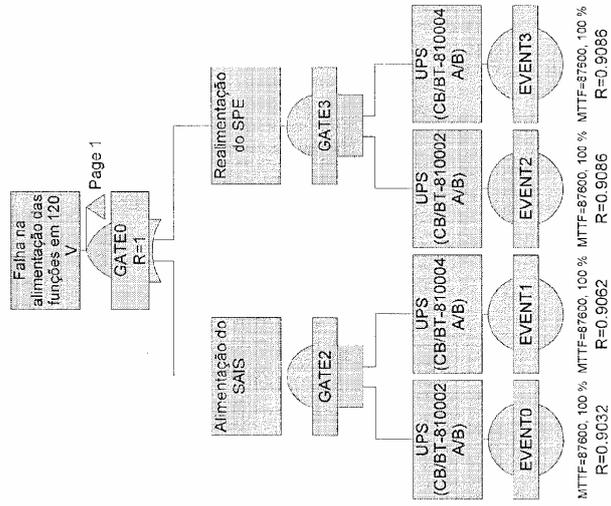




Diagram Report

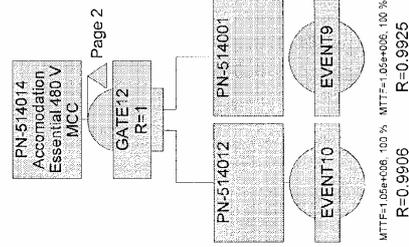




Diagram Report

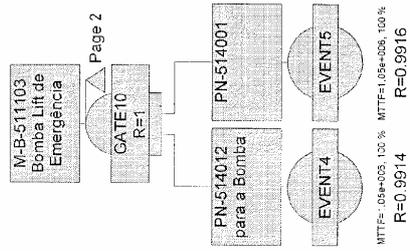




Diagram Report

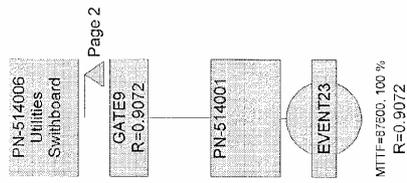




Diagram Report

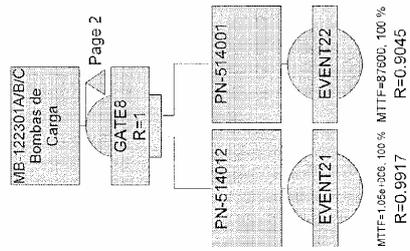




Diagram Report

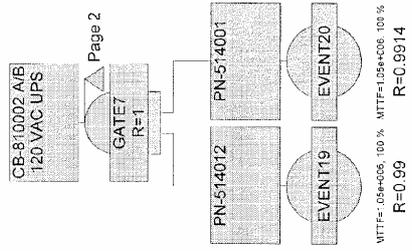




Diagram Report

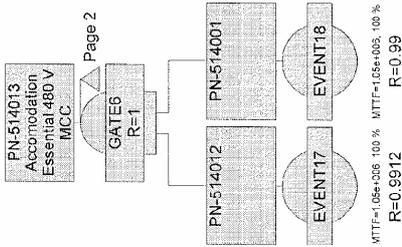




Diagram Report

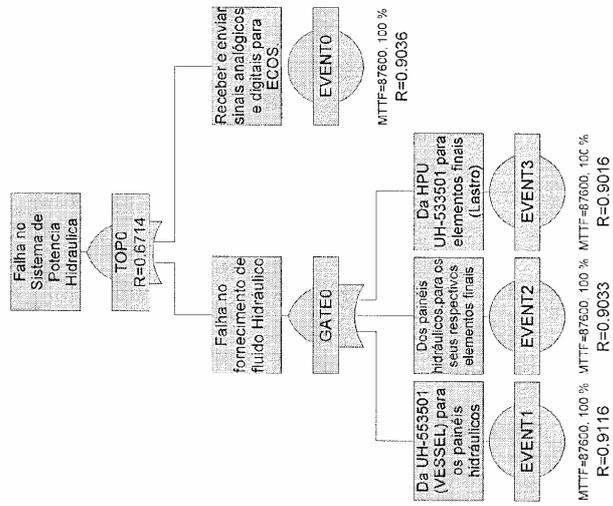
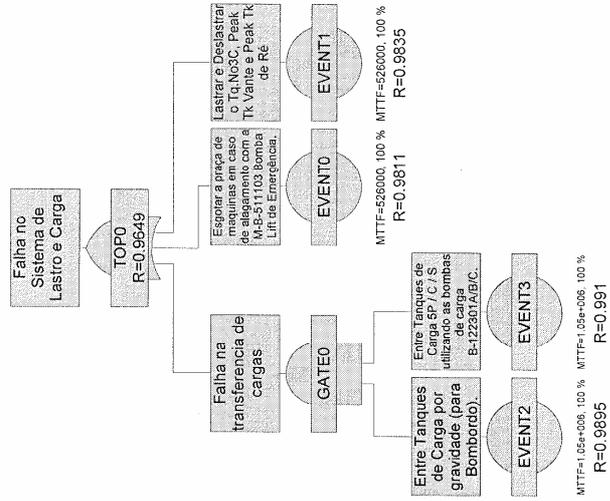




Diagram Report



Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)