		,	
CADMEN	DATINO	RODRIG	1167

# ANÁLISE DE RISCO EM OPERAÇÕES DE "OFFLOADING" – UM MODELO DE AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DINÂMICA PARA A TOMADA DE DECISÃO

Tese de Doutorado apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção de título de Doutor em Engenharia.

São Paulo 2012

## CARMEN ELENA PATINO RODRÍGUEZ

# ANÁLISE DE RISCO EM OPERAÇÕES DE "OFFLOADING" – UM MODELO DE AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DINÂMICA PARA A TOMADA DE DECISÃO

Tese de Doutorado apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção de título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:

Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação

Orientador:

Professor Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 16 de Março de 2012

Carmen Elena Patiño Rodríguez

Autor

Gilberto Francisco Martha de Souza Orientador

## FICHA CATALOGRÁFICA

Patiño Rodriguez, Carmen Elena

Análise de risco em operações de "offloading" – um modelo de avaliação probabilística dinâmica para a tomada de decisão / C.E. Patiño Rodriguez. – ed.rev. -- São Paulo, 2012. 265 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Análise de risco 2. Tomada de decisão 3. Operação offloading I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.

# **DEDICATÓRIA**

A minha família,

pela sua companhia, apoio, amor e pelo incentivo a conquistar meus sonhos e me ensinar a fazer tudo com muita dedicação, compromisso e paixão, e em especial ao Fernando pelo amor, compreensão e companheirismo, por ter caminhado junto a mim em muitos momentos importantes, deste período e da minha vida.

#### AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza, pela confiança no trabalho mostrada desde o primeiro momento e o durante tudo o tempo de realização deste trabalho, pela orientação e por me proporcionar um enorme aprendizado pessoal e profissional.

Ao Fernando Guevara Carazas pelo apoio incondicional, pelos conselhos acertados, e por me ajudar a entender que pequenas descobertas podem se tornar em grandes decisões.

Aos amigos e família pelas experiências compartilhadas, pela proximidade, e pelo apoio durante muitos momentos importantes neste doutorado, especialmente a Lucila Patino pela sua disposição para me escutar durante esta etapa e durante a vida toda, e pelas longas conversas acadêmicas que foram essenciais para entender muitos conceitos e esclarecer muitas ideias. Ao Diego Giraldo e Claudia Ossa pela sua amizade incondicional e por ser meu braço em muitos assuntos na Colômbia. Aos amigos Peruanos, Colombianos e Brasileiros quem foram uma grande companhia neste período.

Ao Erick, Dennis, Erico, Marjorie, Johana, Catalina, e Matheus que realizam ou realizaram parte da sua atividade acadêmica no Laboratório de Confiabilidade e que participaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho. Especialmente a Marjorie Belinelli pela amizade e companhia que foi muito importante na fase final do doutorado. Aos amigos e colegas da USP especialmente a Olga Úsuga, Freddy Hernández e Michel Rejani pela disposição e ajuda quando precisei resolver dúvidas referentes à programação de softwares estatísticos e de simulação. A Maria do Carmo Ferreira pela sua amizade, dedicação e ajuda na revisão deste texto.

Ao Prof. Dr. Eduardo A. Tannuri, pela disponibilização de recursos e auxílio para realizar as simulações no TPN, e pelas suas contribuições que foram muito importantes para enriquecer este trabalho. Ao Prof. Dr. Marcelo Ramos do Departamento de Engenharia Naval e Oceânicas pela disponibilização dos programas no LabRisco e por suas contribuições que muito ajudaram para entender assuntos referentes ao risco na operação de navios petroleiros e na exploração de petróleo em alto mar. Ao comandante Jalmir de Souza pela sua colaboração, esclarecendo minhas dúvidas técnicas sobre a operação de navios aliviadores e plataformas oceânicas de exploração de petróleo.

À Universidade de Antioquia pela licença e suporte concedidos para desenvolver o doutorado. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo suporte financeiro concedido por meio da bolsa de doutorado.

Para explorar campos de petróleo *offshore* em águas profundas, o uso de plataformas *offshore* (FPSO – do inglês *Floating Production Storage and Offloading*)) e navios aliviadores, nas últimas décadas, tornou-se uma alternativa economicamente e tecnicamente viável. A FPSO é um tipo de navio petroleiro transformado para a exploração, e armazenamento petróleo. O escoamento da produção é usualmente realizado por um navio tanque aliviador, conectado em tandem, ou por dutos. Porém o transporte marítimo realizado pelos navios petroleiros está sendo cada vez mais aceito, chegando a ser o principal meio para escoar a produção em águas profundas. Entretanto, como contrapartida desta viabilidade técnica, passou-se a executar operações de transbordo entre unidades flutuantes em ambientes mais agressivos, causando um aumento do risco associado com estas operações.

Este trabalho, visando garantir a segurança das operações de transferência em alto mar, apresenta a aplicação de técnicas de análise de risco para a avaliação de operações de offloading entre unidades de produção tipo FPSO e navios aliviadores. É aplicado um método indutivo para a identificação de riscos baseado no princípio de que os acidentes acontecem como consequência do desenvolvimento de um evento de perigo durante a operação, que pode durar cerca de 24 horas. No contexto deste trabalho de pesquisa, a análise de risco é entendida como quatro processos sequenciais: (i) identificação dos cenários de perigos, (ii) estimação da probabilidade de ocorrência de falhas para cada cenário, (iii) avaliação das consequências, e, (iv) tomada de decisão. Para melhorar a avaliação da probabilidade é proposto o uso de técnicas bayesianas. Para fazer uma análise mais abrangente das consequências de falha é proposto utilizar o processo markoviano para modelar a probabilidade de mudanças do sistema FPSO-navio aliviador durante a operação de offloading que podem causar mudanças no perfil de risco. A tomada de decisão é usada para avaliar a possibilidade de desconexão de emergência durante a operação.

O método é aplicado para avaliar o risco de uma operação de *offloading* na Bacia de Campos (Brasil), entre uma plataforma tipo FPSO e um navio aliviador tipo Suezmax. Verifica-se que as condições ambientais e a forma de realização da amarração exercem significativa influencia no perfil de risco.

To explore *offshore* oil fields in deep water the use of a Floating Production Storage and *Offloading* (FPSO) unit coupled to a shuttle tanker is economically and technically feasible. The FPSO unit normally consists of a ship shaped hull, with an internal or external turret, and production equipment on the deck. The unit is also equipped for crude oil storage. Oil transportation systems required for supporting this infrastructure are pipelines or shuttle tankers. Shuttle tankers are increasingly being accepted as a preferred transportation method for remote and deepwater *offshore* developments. The *offloading* operation is considered one of the most risky operations in *offshore* environments.

This dissertation presents a risk-based analysis method aiming at defining the risk profile associated with an *offloading* operation. For *offloading* operations the risk profile is usually evaluated considering that the environmental condition could suffer changes during *offloading* that has an approximate duration of 24 hours.

The method follows four basic steps: identification of hazard (using PHA technique), definition of failure scenarios and their probability of occurrence (using cause-consequence diagram and FTA) and evaluation of failure consequences. To improve the evaluation of failure consequences a more comprehensive analysis is proposed aiming at using the Markovian process to model the probability of changes during *offloading* operation that could cause changes in the risk profile developed in step two. The decision method is used to evaluate the possibility of emergency disconnection during the operation. The method is applied to evaluate the risk profile of an *offloading* operation in Campos Basin, Brazil, considering o FPSO. The analysis shows that the environmental conditions and the way that the tanker is moored have great influence on the risk profile.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Relação entre perigo e acidente (ERICSON, 2005).	.20
Figura 2.2 Fluxograma da Avaliação Probabilística do Risco.	.21
Figura 2.3 Estrutura típica de árvore funcional.	.23
Figura 2.4 Matriz de dependência.	.24
Figura 2.5 Planilha PHA.	.25
Figura 2.6 Matriz de Risco (RODRIGUEZ, SOUZA e MARTINS, 2009)	.27
Figura 2.7 Exemplo de Solução de Árvore de Falha (SOUZA, 2003)	.31
Figura 2.9 Análise de Árvore de Eventos.	.32
Figura 2.10 Diagrama de sequências de eventos (STAMATELATOS, 2002)	.33
Figura 2.11 Estrutura da árvore de decisão.	.35
Figura 3.1 Relação entre a distribuição <i>A priori</i> , verossimilhança e <i>A posteriori</i>	.43
Figura 3.2 Seleção da função de verossimilhança.	.49
Figura 3.3 Diagrama de Processo de Markov contínuo.	.53
Figura 3.4 Diagrama de Markov para estados do sistema.	.56
Figura 3.5 Análise de informação baseada em informação existente (SANCHEZ, 2005)	60
Figura 4.1 Fluxograma resumido do método proposto.	.63
Figura 4.2 Conceito sequência acidental (adaptado de ERICSON, 2005)	.66
Figura 4.3 Fluxograma para a modelagem da sequência acidental.	.67
Figura 4.4 Framework do método para estimar as probabilidades de ocorrência	.70
Figura 4.5 Fluxograma para obter a estimação das probabilidades.	.70
Figura 4.6 Calculo da probabilidade de uma consequência acontecer.	.71
Figura 4.7 Função de utilidade exponencial e logarítmica para diferentes valores de	
parâmetros (SANCHEZ, 2005).	.73
Figura 4.8 Modelo de tomada de decisão	.74
Figura 4.9 Fluxograma para analisar a mudança de estado em sistemas complexos	.75
Figura 4.10 Algoritmo recorrente para o cálculo das probabilidades	.77

Figura 4.11 Fluxograma modelo matemático	78
Figura 4.12 Árvore de decisão sobre a mudança ou não na estratégia de operação	80
Figura 5.1 Tipo de Acidentes em Operações de Carga e Descarga de Tanques (PLANAS, VILCHEZ e CASAL 1999).	88
Figura 5.2 Fonte de Incidentes que Causaram Vazamento na Operação de FPSO (GILBERT, WARD e WOLFORD, 2001)	89
Figura 5.3 Produção anual de petróleo no Brasil terra e mar. Fonte: ANP	90
Figura 5.4 Esquema de conexão em Tandem (Adaptado de HALS, 1999)	92
Figura 5.5 Idade dos tipos de navio aliviador (MAN, 2009).	93
Figura 5.6 Tipos de sistemas de posicionamento em navio aliviadores (CORREA <i>et al.</i> , 2006)	94
Figura 5.7 Incidentes de Perda de Posição entre 1994-2004 (TJALLEMA <i>et al.</i> , 2007) e 2001-2004 (MORATELLI, 2010)	95
Figura 5.8 Causas de Perda de Posição entre 1994-2004 que causaram Incidentes e Acidentes (TJALLEMA <i>et al.</i> , 2007)	95
Figura 5.9 Árvore Funcional Geral do Processo de <i>Offloading</i>	
Figura 5.10 Árvore Funcional do Motor de Combustão Propulsão	99
Figura 5.11 Setores e limites de operação (TANNURI, MORISHITA, et al. 2009)	102
Figura 5.12 Diagrama Sequêncial de Eventos.	103
Figura 5.13 Árvore de eventos para a operação de <i>offloading</i>	104
Figura 5.14 Árvore de Falhas para o Sistema Posicionamento Dinâmico	105
Figura 5.15 Árvore de Falhas para o MCA	106
Figura 5.16 Árvore de Falhas para o MCP (Contínua)	107
Figura 5.17 Árvore de falha para Bomba Centrífuga do Sistema de Abastecimento de Combustível	110
Figura 5.18 Funções da distribuição A priori e A posteriori para eventos básicos da	
falha da Bomba Centrífuga	110
Figura 5.19 Definição do Estados e Variável Aleatória	114
Figura 5.20 Posição logo após a conexão na condição ambiental I	115
Figura 5.21 Posição logo após a conexão na condição ambiental II.	115

Figura 5.22 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, FPSO (100%),
Alívio de Proa, Sem Falhas
Figura 5.23 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, FPSO (100%),
Alívio de Popa, Sem Falhas
Figura 5.24 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental II, FPSO (100%),
Alívio de Proa, Sem Falhas
Figura 5.25 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental II, FPSO (100%),
Alívio de Popa Sem Falhas
Figura 5.26 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, FPSO (100%),
Alívio de Proa, Falha DP
Figura 5.27 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, FPSO (100%),
Alívio de Popa, Falha DP
Figura 5.28 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental II, FPSO (100%),
Alívio de Proa, Falha DP
Figura 5.29 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental II, FPSO (100%),
Alívio de Popa, Falha DP
Figura 5.30 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, FPSO (100%),
Alívio de Proa, Falha DP e MCP
Figura 5.31 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, FPSO (100%),
Alívio de Popa, Falha DP e MCP
Figura 5.32 Probabilidade do navio aliviador permanecer na zona normal de operação133
Figura 5.33 Probabilidade do navio aliviador retornar na zona normal de operação133
Figura 5.34 Probabilidade do navio aliviador se encontrar em um estado de operação
dada uma sequência acidental
Figura 5.35 Árvores de decisão para continuar ou interromper a operação sabendo que
uma sequência acidental ocorreu
Figura 5.36 Probabilidade do navio aliviador sair da zona de operação normal $(P_{12})$ 140
Figura 5.37 a) Probabilidade da consequência B acontecer dado que o navio aliviador
saiu da zona de operação normal, FPSO 100%; b) Probabilidade da consequência C
acontecer dado que o navio aliviador saiu da zona de operação normal, FPSO 100% 142

Figura 5.38 a) Probabilidade da consequência B acontecer dado que o navio aliviador
saiu da zona de operação normal, Aliviador 100%; b) Probabilidade da consequência
C acontecer dado que o navio aliviador saiu da zona de operação normal, Aliviador
100%
Figura 5.39 Árvore de decisão para a operação de <i>offloading</i> 144
Figura 6.1 Probabilidade de estar em S1 a) $\Delta t$ =5, b) $\Delta t$ =2, c) $\Delta t$ =1, d) $\Delta t$ =0.1153
Figura 6.2 Comportamento da decisão pela variação da pontuação de x na condição
IProaC1 a) Sem falha, b) Com falha do DP, c) Falha do DP e MCP
Figura 6.3 Comportamento da decisão pela variação da pontuação de x na condição
IProaC2 a) Sem falha, b) Com falha do DP, c) Falha do DP e MCP
Figura 6.4 Comportamento da decisão pela variação da pontuação de x na condição
IPopaC1 a) Sem falha, b) Com falha do DP, c) Falha do DP e MCP
Figura 6.5 Comportamento da decisão pela variação da pontuação de x na condição
IPopaC2 a) Sem falha, b) Com falha do DP, c) Falha do DP e MCP160
Figura 6.6 Comportamento da decisão pela variação da pontuação de x na condição
IIProaC1 a) Sem falha, b) Com falha do DP, c) Falha do DP e MCP162
Figura 6.7 Comportamento da decisão pela variação da pontuação de x na condição
IIProaC2 a) Sem falha, b) Com falha do DP, c) Falha do DP e MCP163
Figura 6.8 Comportamento da decisão pela variação da pontuação de x na condição
IIPopaC1 a) Sem falha, b) Com falha do DP, c) Falha do DP e MCP165
Figura 6.9 Comportamento da decisão pela variação da pontuação de x na condição
IIPopaC2 a) Sem falha, b) Com falha do DP, c) Falha do DP e MCP166
Figura 6.10 Ramo 1 da Árvore de Decisão continuar a operação de offloading no
momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal 167
Figura 6.11 Ramo 2 da Árvore de Decisão continuar a operação de offloading no
momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal 168
Figura 6.12 Análise de sensibilidade do ramo 1 para continuar a operação de offloading
no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal
para IProaC1
Figura 6.13 Análise de sensibilidade do ramo 1 para continuar a operação de offloading
no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal
para IProaC2

Figura 6.14 Análise de sensibilidade do ramo 1 para continuar a operação de <i>offloading</i> no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IPopaC1	.69
Figura 6.15 Análise de sensibilidade do ramo 1 para continuar a operação de <i>offloading</i> no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IPopaC2	.70
Figura 6.16 Análise de sensibilidade do ramo 1 para continuar a operação de <i>offloading</i> no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IIProaC1	.70
Figura 6.17 Análise de sensibilidade do ramo 1 para continuar a operação de <i>offloading</i> no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IIProaC2	71
Figura 6.18 Análise de sensibilidade do ramo 1 para continuar a operação de <i>offloading</i> no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IIPopaC1	.71
Figura 6.19 Análise de sensibilidade do ramo 1 para continuar a operação de <i>offloading</i> no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IIPopaC2	.72
Figura 6.20 Ramo 1 da Árvore de Decisão para interromper a operação de <i>offloading</i> no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal1 Figura 6.21 Ramo 2 da Árvore de Decisão para interromper a operação de <i>offloading</i> no	.72
momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal1  Figura 6.22 Análise de sensibilidade do ramo 1 para interromper a operação de  offloading no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de  operação normal para IProaC1	
Figura 6.23 Análise de sensibilidade do ramo 1 para interromper a operação de offloading no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IProaC2	.74
Figura 6.24 Análise de sensibilidade do ramo 1 para interromper a operação de <i>offloading</i> no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IPopaC1	.74

Figura 6.25 Análise de sensibilidade do ramo 1 para interromper a operação de
offloading no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de
operação normal para IPopaC2
Figura 6.26 Análise de sensibilidade do ramo 1 para interromper a operação de
offloading no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de
operação normal para IIProaC1
Figura 6.27 Análise de sensibilidade do ramo 1 para interromper a operação de
offloading no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de
operação normal para IIProaC2
Figura 6.28 Análise de sensibilidade do ramo 1 para interromper a operação de
offloading no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de
operação normal para IIPopaC1
Figura 6.29 Análise de sensibilidade do ramo 1 para interromper a operação de
offloading no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de
operação normal para IIPopaC2

# LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2 Classificação da frequência de ocorrência de eventos de perigo (CORREA	
et al., 2006)	26
Tabela 2.3 Classificação de consequências (CORREA, et al., 2006)	26
Tabela 2.4 Símbolos dos Eventos da FTA (adaptado de GRANT e COOMBS, 1996)	30
Tabela 2.5 Representação dos conectores (portões) lógicos em uma árvore de falha (adaptado de GRANT e COOMBS, 1996)	30
Tabela 2.6 Regras da Álgebra de Boole (BAHR, 1997)	31
Tabela 2.7 Símbolos usados na análise causa consequência (ANDREWS e RIDLEY, 2001).	34
Tabela 2.8 Técnicas de análise de risco usualmente usadas na PRA.	37
Tabela 3.1 Distribuições A priori geradas com o método de máxima entropia (SIU e	
KELLY, 1998)	47
Tabela 3.2. Probabilidades de transição.	57
Tabela 4.1 Famílias conjugadas (LINDLEY, 1965)	68
Tabela 4.2 Funções de Utilidade (SANCHEZ, 2005)	73
Tabela 4.3 Distribuições de probabilidade (MODARRES, 1993).	76
Tabela 4.4 Exemplo de problema de decisão	81
Tabela 4.5 Avaliação do risco para o exemplo do problema de decisão	81
Tabela 4.6 Comparação entre diversas aplicações de análise de risco	83
Tabela 5.1 Causas gerais de acidentes em carga e descarga de tanques (PLANAS,	
VILCHEZ e CASAL 1999).	89
Tabela 5.2 Tipos de navios aliviadores (MAN, 2009)	93
Tabela 5.3 Resumo dos eventos de perigo classificados por fase.	97
Tabela 5.4 Exemplo de Análise Preliminar de Perigos para alguns componentes da	
operação de offloading	100

Tabela 5.5 Probabilidade A Posteriori dos Eventos Básicos para a Falha na Bomba
Centrífuga 111
Tabela 5.6 Probabilidade de um Evento de Perigo
Tabela 5.7 Probabilidade do Cenário de Risco Acontecer Durante a Operação de
Offloading112
Tabela 5.8 Probabilidade de uma consequência acontecer
Tabela 5.9 Condições Ambientais para a Simulação no TPN
Tabela 5.10 Condições Operacionais para a Simulação no TPN
Tabela 5.11 Parâmetros da distribuição da posição angular do navio aliviador em cada
estado e sequência acidental
Tabela 5.12 Probabilidade do navio aliviador se encontrar em $S_1$ ou $S_2$ dada uma
sequência acidental
Tabela 5.13 Alternativas para a seleção da estratégia de operação dado que não
aconteceu falha
Tabela 5.14 Alternativas para a seleção da estratégia de operação dado que falha o DP136
Tabela 5.15 Alternativas para a seleção da estratégia de operação dado que falha o DP
e MCP/MCA
Tabela 5.16 Valor da avaliação do risco da mudança da estratégia de operação quando
ocorre uma sequência acidental
Tabela 5.17 Probabilidade que uma consequência ocorra dado que o navio mudou de zona
de operação S1 para S2
Tabela 5.18 Avaliação do risco
Tabela 6.1 Condição Ambiental I com FPSO Cheio - Aliviador Vazio e Alívio de Proa. 148
Tabela 6.2 Condição Ambiental I com FPSO Vazio - Aliviador Cheio e Alívio de Proa. 148
Tabela 6.3 Condição Ambiental I com FPSO Cheio - Aliviador Vazio e Alívio de
Popa
Tabela 6.4 Condição Ambiental I com FPSO Vazio - Aliviador Cheio e Alívio de
Popa
Tabela 6.5 Condição Ambiental II com FPSO Cheio - Aliviador Vazio e Alívio de
Proa 150

LISTA DE TABELAS 11

Tabela 6.6 Condição Ambiental II com FPSO Vazio - Aliviador Cheio e Alívio de	
Proa1	50
Tabela 6.7 Condição Ambiental II com FPSO Cheio - Aliviador Vazio e Alívio de	
Popa1	51
Tabela 6.8 Condição Ambiental II com FPSO Vazio - Aliviador Cheio e Alívio de	
Popa1	52
Tabela 6.9 Parâmetros equivalentes para a validação1	53

#### LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SMS Differentiated Anchoring System

DP Posicionamento Dinâmico (*Dynamic Positioning*)

ET Event Tree

ETA Event Tree Analysis

FMEA Failure Modes and Effect Analysis

FPSO Floating Production Storage and Offloading

FSA Formal Safety Assessment

FTA Fault Tree Analysis

GNL Gas Natural Liquefeito

HSE Health and Safety Executive

IMO Maritime Organization International

MCA Motor de Combustão Auxiliar

MCP Motor de Combustão Principal

MTTF Tempo médio até a falha

PHA Preliminary Hazard Analysis

PRA Probabilistic Risk Analysis

QRA Quantitive Risk Analysis

TPN Tanque de Provas Numérico

# LISTA DE SÍMBOLOS

E[x]	Valor esperado de <i>x</i>
f(ullet)	Função densidade de probabilidade
$F(\bullet)$	Função Acumulada da densidade de probabilidade
$I(\theta)$	Função entropia
$\lambda(t)$	Função Taxa de falha
$\lambda_{ij}(t)$	Taxa de transição entre dois estados
$L(E \theta)$	Função de verossimilhança
$p_{ij}$	Probabilidade de transição entre dois estados $i$ e $j$
$P_0(\theta)$	Função de distribuição a priori
$P(\theta E)$	Função de distribuição a posteriori
$P_i(t)$	Probabilidade do sistema estar no estado $i$ no tempo $t$
$P(S_i K_i)$	Probabilidade de que o sistema esteja em um estado específico, $S_i$ , de operação,
	considerando a ocorrência de uma consequência $K_i$
$P(K_i)$	Probabilidade de que os cenários de falha conduzam a uma consequência $K_i$ .
R(ullet)	Confiabilidade
$\sigma[x]$	Desvio padrão de x
X(t)	Estados que um sistema pode assumir no tempo t

# **SUMARIO**

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO	1
	onsiderações Iniciais	
	bjetivos	
	. Objetivo Geral	
	2. Objetivos Específicos	
1.3. E	scopo do Trabalho	6
CAPÍTULO 2	AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DO RISCO	8
2.1. C	onsiderações Iniciais	8
2.2. F	undamentos da Avaliação Probabilística de Risco	ç
2.2.1	. Estado da Arte da Avaliação Probabilística de Risco	9
2.2.2	2. Conceitos Básicos	16
2.2.3	3. Componentes da Análise Probabilística de Risco	20
2.3. T	écnicas de Qualificação e Quantificação do Risco	22
2.3.1	. Técnicas de Análise de Risco	22
2.3.2	2. Técnicas de Avaliação de Risco	28
2.4. C	onsiderações Finais	36
CAPÍTULO 3	FUNDAMENTOS DE ESTIMAÇÃO E INFERÊNCIA PROBABILÍSTICA SOB INCERTEZA	38
3.1. C	onsiderações Iniciais	38
3.2. P	rincípios Básicos de Inferência bayesiana	38
3.2.1	. Probabilidade	39
3.2.2	2. Generalização do Teorema de Bayes	40
3.2.3	8. Estimação de Parâmetros bayesianos	42
3.3. A	nálise de Markov	51
3.3.1	. Conceitos Básicos da Análise de Markov	52

3.	.3.2.	Processo Semi-Markov	55
3.4.	Мо	delo de Decisão Sob Incerteza	58
3.	.4.1.	Decisões Baseadas em Valor Esperado	59
3.	.4.2.	Valor Esperado Baseado em Evidência	60
3.5.	Cor	nsiderações Finais	60
CAPÍTULO	) 4	PROPOSTA DE MODELO DE AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DE RISCO PARA TOMADA DE DECISÕES DECISÃO EM SISTEMAS DE SEGURANÇA CRÍTICA	62
4.1.	Cor	nsiderações Iniciais	62
4.2.	Ide	ntificação e modelagem dos Cenários de Risco	64
4.	.2.1.	Identificação e Caracterização do Sistema	64
4.	.2.2.	Identificação de Eventos de Perigo	65
4.	.2.3.	Modelagem da Sequência Acidental	66
4.3.	Est	imação da Probabilidade	68
4.4.	Ava	aliação das Consequências	71
4.	.4.1.	Função Utilidade	71
4.5.	АТ	omada de Decisão	73
4.	.5.1.	Análise de Mudança de Estado	74
4.	.5.2.	Análise das consequências em Função das Mudanças de Estado	77
4.	.5.3.	Processo de Tomada de Decisão	79
4.	.5.4.	Validação do modelo de Tomada de Decisão	80
4.6.	Cor	nsiderações Finais	82
CAPÍTULO 5		APLICAÇÃO DO MODELO DE AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DINÂMICA NA OPERAÇÃO DE <i>OFFLOADING</i> EM SISTEMAS <i>OFFSHORE</i>	87
5.1.	Cor	nsiderações Iniciais	87
5.2.	Ide	ntificação e modelagem dos Cenários de Perigo na Operação de	
	Offi	loading	92
5.3.	Ava	aliação de Probabilidade para os Cenários de Risco na Operação de	
	Off	loadina	104

5.4.	Avaliação das Consequências na Operação de Offloading	.112
5.5.	Análise de Decisão	.112
5.	.5.1. Análise de Mudança de Estado	.113
5.	.5.2. Probabilidade de uma Sequência Acidental Acontecer dada uma	
Mudo	ança de Estado	.139
5.6.	Considerações Finais	145
CAPÍTULO	) 6 VALIDAÇÃO DO MODELO E DOS RESULTADOS	.147
6.1.	Considerações Iniciais	147
6.2.	Validação Estadística da Seleção de Parâmetros para as Distribuições de	
	Probabilidade	.147
6.3.	Validação do Algoritmo Recorrente	.152
6.4.	Análise de Sensibilidade da análise de Decisão	154
6.5.	Considerações Finais	.177
CAPÍTULO	7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	.178
APÊNDIC	CE A DESCRIÇÃO DE OPERAÇÃO DO MOTOR DE COMBUSTÃO PRINCIPAL DO NAVIO ALIVIADOR	.197
A.1.	Análise de Matrizes de Dependência para o MCP	204
APÊNDIC	CE B ANÁLISE PRELIMINAR DE PERIGOS PARA A OPERAÇÃO DE OFFLOADING	.207
APÊNDIC	CE C CÁLCULO DE PROBABILIDADE DO EVENTO DE PERIGO: FALHA NO MCP	.193
APÊNDIC	CE D RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	197
APÊNDIC	CE E CÓDIGOS EM R E EM MATLAB	.211
E.1.	Código em R para Calcular a Distribuição de Probabilidade do aliviador	
	Estar em um Estado	211
E.2.	Código e Matlab Para Calcular a Probabilidade do Aliviador Estar em	
	um Estado de Operação	212
E.3.	Código em Matlab de Validação do Algoritmo Recorrente	212
A DÊNIDIC	ΤΕ Ε ΑΥΛΙΙΛΟÃΟ ÁΡΥΟΡΕ DE DECISÃO	215

SUMARIO XVII

F.1.	Árvore de Decisão sobre Interromper ou Continuar com a Operação de					
	Offloading quando o Navio Aliviador Está Fora da Área de Operação e					
	Acontece uma Sequência Acidental	.215				
F.2.	Árvore de Decisão sobre Interromper ou Continuar com a Operação de					
	Offloading quando uma Sequência Acidental Ocorre dada uma Mudança					
	de Estado	.218				
ANEXO A	CARACTERÍSTICAS DO NAVIO ALIVIADOR SUEZMAX DP E DA					
	PLATAFORMA FPSO USADOS NA SIMULAÇÃO	215				

## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A ocorrência de acidentes em sistemas complexos como, por exemplo, plataformas de exploração de petróleo e gás natural em ambientes marítimos, usinas termoelétricas, centrais nucleares, entre outros, causa grandes prejuízos financeiros, uma vez que são interrompidas suas operações e, além disso, podem causar danos às pessoas, à propriedade, ao meio ambiente ou à combinação destes. Portanto, existe um grande desafio na análise de risco de sistemas e/ou operações complexas para identificar fatores e pontos vulneráveis que podem ser geradores de cenários inaceitáveis de operação, visando minimizar a probabilidade de ocorrência dos eventos indesejáveis que gerem estes cenários e seu impacto, tanto para o meio ambiente e as operações como para as pessoas envolvidas no processo. Do mesmo modo, busca-se minimizar as consequências econômicas, seja em função da perda de algum equipamento ou da parada na operação do sistema.

Neste contexto, o risco pode ser definido como uma medida resultante da combinação entre as frequências de ocorrência de eventos indesejados e a magnitude das perdas associadas a estes eventos, que podem ser entendidas como danos ou consequências. Deste modo, eventos indesejados e falhas nos sistemas podem causar cenários inaceitáveis do ponto de vista de operação ou de segurança. Por esta razão, torna-se fundamental o uso efetivo de modelos que visem a identificação das fontes e dos efeitos de um determinado cenário inaceitável de operação para obter os diferentes cenários de acidentes e o desenvolvimento das falhas. Estes modelos, então, terão a capacidade de apoiar a tomada de decisões com o objetivo de mitigar as causas e conter as consequências, ou seja, orientar a adoção de medidas de contingência.

É sabido que, historicamente, a necessidade de quantificar o risco antecede a tomada de decisão e, portanto, a tomada de decisão pode ser entendida como o objetivo último da análise de risco (SINGPURWALLA, 2006). Nas últimas décadas, devido à crescente necessidade de se tomar decisões estruturadas que obedeçam a critérios de repetibilidade e reprodutibilidade, tem-se observado, no âmbito técnico, científico e industrial, um esforço para formalizar, ainda mais, os conceitos sobre confiabilidade e especialmente os conceitos associados com a quantificação do

INTRODUÇÃO 2

risco mediante métodos que consigam modelar com boa confiança a realidade operacional de um sistema.

Desta forma, a necessidade de quantificar o risco e sua incerteza permitiu que os conceitos de avaliação probabilística do risco se desenvolvessem visando a proposição de métodos que cada vez se aproximem mais a realidade e que conseguissem incorporar diversas fontes de informação na sua quantificação, como será discutido no decorrer deste texto.

A avaliação probabilística do risco, visando a segurança e o alto desempenho operacional dos sistemas, permite aplicar os conceitos de confiabilidade e risco com o objetivo de estimar e quantificar tanto a probabilidade quanto as consequências de acidentes em um sistema, instalação ou processo.

Tradicionalmente, a análise de risco tem sido tratada através de uma abordagem clássica, onde a probabilidade independe do analista. Este conceito de probabilidade é do tipo frequentista e, deste modo, a análise de risco tradicional não utiliza fontes de informação como a experiência do analista e a possibilidade de que a probabilidade de um evento mude pela obtenção de nova informação sobre do sistema. Em algumas ocasiões, a quantificação do risco requer a quantificação da probabilidade de eventos raros, com poucos dados existentes e, para consegui-la, normalmente, é preciso empregar o julgamento de especialistas como, por exemplo, no caso de estudos envolvendo usinas nucleares, e manutenção de sistemas, entre outros. Portanto, chega a ser evidente que, em muitos casos, a quantificação do risco não pode ser realizada usando métodos estatísticos tradicionais da estatística clássica, principalmente pela escassez de dados empíricos relevantes (SIU e KELLY, 1998).

Além disso, em sistemas complexos e de segurança crítica frequentemente podem ocorrer eventos indesejáveis de baixa probabilidade de falha e com poucos dados históricos disponíveis e, ao analisá-los, é preciso controlar uma quantidade considerável de variáveis que aumentam a incerteza e a complexidade da decisão. Uma decisão errada pode comprometer seriamente o funcionamento do sistema, com danos sem possibilidade de reparo ou de reparo muito demorado ou, até mesmo, pode causar morte ou lesões graves em uma ou mais pessoas, dentro e nos arredores da instalação. Assim, nos sistemas de segurança crítica, as falhas de equipamentos tendem a ser eventos raros e os dados empíricos para estimar os parâmetros são geralmente dispersos. Nestes casos, os métodos da estatística clássica não têm bom desempenho já que geram intervalos de confiança muito amplos e não permitem incorporar informações de diferentes fontes como o conhecimento de consultores especialistas e probabilidades subjetivas. Deste modo, as técnicas de estimação bayesianas são mais adequadas para determinar a probabilidade de um

sistema atingir determinado estado (CHRISTENSEN*et al.*, 2010). Assim, a combinação das ferramentas de análise de risco com métodos bayesianos permite obter modelos que incorporem não só dados históricos como também conhecimento de especialistas no projeto e da operação do sistema.

Diante do exposto, para a análise de risco de sistemas complexos de segurança crítica devem ser considerados os diversos fatores relacionados ao risco da sua operação dos elementos que compõem o sistema, já que a operação envolve falhas e consequências específicas. Portanto, estes sistemas requerem, especialmente, modelos que analisem o sistema no decorrer da operação. Por outro lado, não se pode esquecer que o modelo para a análise probabilística de risco é desenvolvido com a finalidade de auxiliar a tomada de decisão. Embora a literatura sobre decisão seja ampla, pouco é encontrado sob o ponto de vista de modelos de decisão quantitativos. Falck*et al.* (2000) destacam a importância da análise probabilística do risco como apoio à tomada de decisão, porém, eles abordam este aspecto do ponto de vista qualitativo.

Em resumo, pode-se afirmar que existe um grande desafio quanto à modelagem das causalidades que existem nos sistemas complexos e, consequentemente, é necessário desenvolver modelos que identifiquem as falhas de maneira contextual e estimem as probabilidades considerando as relações "causas - consequências" associadas com uma falha específica. Obtémse, assim, uma representação realista da natureza das interações dentro do sistema podendo ser aplicada em ambientes que mudam no decorrer da operação.

O modelo apresentado neste trabalho é uma alternativa que pode ser empregada para representar um grande número de sistemas em diferentes áreas e cuja segurança e operação seja um fator crítico. Este tem como objetivo apoiar a tomada de decisão identificando os fatores e pontos vulneráveis do sistema que possam causar consequências graves, visando reduzir a probabilidade de ocorrência e seu impacto, tanto no âmbito ambiental quanto para as pessoas envolvidas nas operações. Este trabalho apresenta um método que apoia a tomada de decisão baseada em uma análise probabilística do risco, usando uma abordagem dinâmica que considera a atualização de probabilidades quando existem novas evidências sobre a ocorrência de falhas e que considere a chance de que as condições operacionais mudem no decorrer do processo.

O sistema complexo de segurança crítica selecionado para aplicar o modelo desenvolvido é a operação de *offloading* entre uma FPSO (do inglês *Floating Production Storage and Offloading*) e um navio aliviador tipo Suezmax.

A importância de realizar a análise neste sistema baseia-se na constatação que a perfuração de poços para a exploração de petróleo no mar avança em grande escala, atingindo

profundidades cada vez maiores. Esta situação gerou a necessidade de aperfeiçoamento dos sistemas de transferência e de transporte para um melhor aproveitamento operacional do sistema de exploração. O uso de navios aliviadores é viável em tal ambiente, especialmente do ponto de vista dos custos de transporte. O custo de fazer este transporte por dutos aumenta de forma significativa quando a lamina d'água cresce, enquanto os custos de transporte por navios aliviadores são insensíveis, até certo ponto, à magnitude da lamina d'água.

Deve-se entender que o transporte de petróleo e seus derivados vai ser determinante no desempenho de outras operações como o escoamento da produção dos campos petrolíferos e a distribuição dos produtos processados. Para viabilizar estas atividades, tem-se a integração de meios de transporte e instalações e, portanto, analisar e quantificar o risco associado a estas operações torna-se tarefa fundamental, especialmente quando se considera que, no Brasil, mais de 75% de todas as reservas de petróleo encontram-se em águas profundas e ultra profundas.

#### 1.2. OBJETIVOS

#### 1.2.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um método de análise de risco em sistemas complexos quando existem eventos externos e internos que afetam o desempenho do sistema e que fazem parte de uma sequência de eventos de perigo, cujos efeitos podem resultar em consequências graves para o sistema, em função da mudança inesperada das condições iniciais da operação. Deste modo, propõe-se um modelo híbrido para a análise de risco, baseado na integração de árvore de eventos, árvore de falhas, análise bayesiana e análise de Markov, aplicado à operação de offloading entre uma plataforma tipo FPSO e um navio aliviador tipo Suezmax, com capacidade de carga entre 125.000 e 165.000 dwt (do inglés Deadweight tonnage). O modelo se inicia com a identificação dos cenários de perigo que é obtida por meio da identificação e caracterização do sistema e suas relações funcionais para, posteriormente, serem definidos os eventos iniciadores dos cenários de perigo, bem como as sequências de propagação dos efeitos dos mesmos que podem conduzir a um acidente. Nesta etapa, são usadas técnicas como a análise preliminar de perigos, PHA (do inglês Preliminary Hazard Analysis) e análise funcional. Posteriormente, para a avaliação das probabilidades de ocorrência de cada cenário, o sistema é modelado através da árvore de falhas, FTA (do inglês Fault Tree Analysis) e, usando modelos de inferência bayesiana, é calculada a chance de que um cenário de perigo aconteça. Para a avaliação das consequências é usada a árvore de eventos, ET (do inglês Event Tree), onde um processo markoviano é usado para modelar a

probabilidade de mudanças do sistema. Estas probabilidades servirão de apoio à tomada de decisão.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Aplicar os conceitos de análise de risco, usando técnicas de análise bayesiana e de Markov, com o objetivo de auxiliar a tomada de decisões no que se refere às mudanças na estratégia de operação quando existe uma mudança repentina nas condições em que a operação é executada.
- Fornecer uma medida quantitativa como suporte do processo de tomada de decisão, visando reduzir a possibilidade de que ocorram incidentes que venham a afetar o desempenho ou causar acidentes que originem consequências de magnitudes consideradas perigosas ou de alto risco.
- Aplicar o modelo proposto para analisar as operações de transferência de petróleo em atividades offshore. Deste modo, será executada uma análise de risco qualitativa e quantitativa de uma operação de offloading em cenários distintos.
  - Apresentar a definição de eventos indesejados e suas respectivas combinações, cuja ocorrência pode implicar em uma grave degradação do processo de *offloading*, que poderia induzir até um incidente com possibilidade de colisão entre o navio aliviador e o FPSO.
  - Definir a sequência acidental destes eventos e o risco que será calculado para cada uma destas.
  - Obter a probabilidade para cenários de falhas dada a probabilidade de que o sistema esteja em uma condição inicial. O resultado final deverá captar o dinamismo do sistema e possibilitar a atualização de novas evidências. Tais evidências podem ser novas informações ou novos acontecimentos.

Dentre as contribuições deste trabalho pode-se ressaltar que é apresentada, de forma estruturada e organizada, a aplicação de uma análise probabilística e dinâmica de risco para um sistema que se caracteriza pela combinação e inter-relação complexa de diferentes elementos como pessoas, operações e ambiente. Esta análise avalia, de forma dinâmica, as consequências e a possibilidade de incorporação de mudanças de estado dentro da avaliação de risco, com o objetivo de apoiar a tomada de decisão referente à mudança da estratégia de operação.

INTRODUÇÃO 6

O método apresentado é diferente dos existentes na literatura pelo fato de ser um modelo híbrido para a tomada de decisão, incorporando duas variáveis que não têm sido consideradas dentro do mesmo modelo matemático: a mudança de estado no decorrer da operação e avaliação probabilística dependente do estado de conhecimento para eventos raros, bem como a incorporação de fatores internos e externos que possam afetar o desempenho da operação e possam causar danos ao meio ambiente ou pessoal de operação do sistema. Desta forma o modelo proposto é uma combinação das técnicas de análise de risco, análise bayesiana e análise de Markov.as quais são inter-relacionadas de uma forma sequencial possibilitando o desenvolvimento de um modelo matemático para a análise e tomada de decisão.

Outra contribuição importante desta tese é mostrar a aplicação do método em um caso de estudo real de um sistema complexo que integra, de forma lógica e estruturada, os modelos matemáticos com simulação numérica e análises de cenários de falha. Possibilita, assim, a identificação dos pontos críticos na operação de sistemas complexos com as técnicas de representação de cenários para, posteriormente, apurar um valor numérico associado ao risco da operação, mostrando como o risco pode deixar de ser uma valoração qualitativa e se tornar uma parte integral no processo de tomada de decisão.

#### 1.3. ESCOPO DO TRABALHO

Esta tese é composta por oito capítulos e seis apêndices. Após a introdução e apresentação dos objetivos deste trabalho, os Capítulos 2 e 3 apresentam o referencial teórico utilizado para desenvolver a tese. No Capítulo 2 são abordados os principais aspectos da avaliação probabilística do risco onde se detalha o estado da arte, explorando suas principais áreas de aplicação e seus principais elementos e características. No Capítulo 3, definições e considerações sobre os conceitos de teoria de probabilidade e inferência bayesiana são apresentadas, analisando as diferentes abordagens destes conceitos e as diferenças entre as definições frequentista e bayesiana. Neste capítulo, também são apresentados os conceitos de análise de Markov e suas abordagens discreta e contínua, além das considerações referentes à análise de decisão sob incerteza.

No Capítulo 4 define-se a proposta do método de avaliação probabilística de risco para a tomada de decisão, considerando-se os fatores que influenciam esta definição. Adicionalmente, são selecionadas as técnicas de modelagem utilizadas para cada etapa do método.

No Capítulo 5 são exibidos os resultados da aplicação do método para analisar operações de transferência de combustíveis em atividades *offshore* entre um FPSO e um navio aliviador do tipo

introdução 7

Suezmax na Bacia de Campos, no Brasil. Na sequência, os Capítulos 6 e 7 apresentam as conclusões da tese e as referências bibliográficas.

Finalmente, são apresentados seis apêndices. O Apêndice A apresenta a descrição de operação do motor de combustão principal do navio aliviador. O Apêndice B apresenta a análise preliminar de perigos para a operação de *offloading*. O Apêndice C mostra o cálculo da probabilidade do evento de perigo: falha no MCP. Os resultados da simulação realizada no simulador do TPN são apresentados no Apêndice D. Os códigos utilizados no decorrer da tese para obter diversos resultados, desenvolvidos nos programas R e Matlab, são apresentados no Apêndice E. Por último, o Apêndice F mostra a avaliação detalhada das árvores de decisão desenvolvidas no Capítulo 5.

# CAPÍTULO 2 AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DO RISCO

### 2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Termos como credibilidade, perigo, integridade, confiabilidade, segurança, incerteza e risco tornaram-se importantes no vocabulário diário das diversas áreas da indústria, mas, muitas vezes, são usados de forma imprecisa. Por exemplo, o termo "confiável", em muitas ocasiões, é utilizado para descrever o comportamento de um indivíduo ou uma organização. O termo "segurança" é frequentemente relacionado com um determinado nível de convivência harmoniosa dentro da sociedade, garantida pelas forças da ordem ou é relacionado com a operação de componentes sem afetar a integridade física de quem usa o componente. Da mesma forma, a palavra "risco" é usada para advertir uma possível exposição a uma consequência adversa e muitas vezes este termo substitui o termo "perigo". O ponto é que, no cotidiano e algumas vezes na área técnica, existe uma tendência de usar estes termos alternadamente ou de forma incorreta, desconhecendo suas diferenças do ponto de vista matemático, estatístico e metodológico. No entanto, o aumento da complexidade de operação dos sistemas, assim como a necessidade de tomar decisões a partir dos diferentes comportamentos do sistema em cenários adversos de operação, obriga o analista a definir com precisão cada um destes termos, bem como definir modelos para a quantificação do risco e da confiabilidade (SINGPURWALLA, 2006).

O foco principal deste capítulo e desta pesquisa é o risco. Este conceito pode ser entendido como uma evolução dos conceitos de confiabilidade e segurança e possui a vantagem de possibilitar o estabelecimento de modelos que permitem obter uma medida numérica do mesmo e não só uma percepção qualitativa. Este valor subsidia a utilização da segurança e incerteza como métricas para a tomada das decisões (MIGON e LOPES 2002).

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos relacionados com a avaliação probabilística de risco, iniciando pela apresentação do estado da arte, com o intuito de reunir, analisar e discutir as informações publicadas até o momento sobre a análise probabilística de risco. Da mesma forma, pretende-se estudar a evolução da análise probabilística de risco, especialmente os desafios que esta metodologia enfrenta nas indústrias naval e de exploração de petróleo em ambientes marítimos. Posteriormente, serão apresentados os elementos que compõem a avaliação

probabilística de risco e serão definidas as diferentes metodologias que permitem abordar cada um destes elementos.

## 2.2. FUNDAMENTOS DA AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DE RISCO

#### 2.2.1. Estado da Arte da Avaliação Probabilística de Risco

A preocupação com a segurança existe há séculos. Os primeiros registros conhecidos datam da Idade Média e correspondem às primeiras leis que estabeleciam compensação em caso de lesões durante o trabalho. No século XIX, nos Estados Unidos e na Grã Bretanha, foram institucionalizados os termos "segurança" e "risco" sob a visão do mercado de trabalho e foram criadas leis para regulamentar a responsabilidade do empregador em caso de acidentes de trabalho. No século XX, antes da Segunda Guerra Mundial, foi implantado nos Estados Unidos um programa para a prevenção de acidentes.

Em 1930, após a depressão econômica sofrida pelos Estados Unidos e pelo mundo, os problemas no comércio suscitaram o interesse nos tópicos de tomada de decisão e análise de risco. Durante e após a Segunda Guerra Mundial e com o início da tecnologia nuclear, a análise de risco começa a ser muito importante na medida em que torna-se relevante quantificar os níveis de segurança das operações. Assim, neste período, como resposta à necessidade de se obterem estimativas sobre a segurança dos sistemas, surge a Avaliação Probabilística do Risco – PRA (do inglês *Probabilistic Risk Analysis*).

Porém, foi durante as décadas de 60 e 70 que a especificação do risco começou a ser exigida para regulações de diversas instalações industriais, como por exemplo, na segurança requerida na indústria de geração de energia elétrica com o emprego de usina termoelétrica baseada em reatores nucleares (WASH-1400, 1975; KELLER e MODARRES, 2005). Na metade da década dos anos 70, alguns conceitos de gestão do risco foram introduzidos em políticas públicas associadas com a geração de energia nuclear e a maioria destes desenvolvidos como resultado dos principais desastres observados na indústria química. No entanto, nestas décadas o interesse se centrava na quantificação da confiabilidade (probabilidade de sucesso) para satisfazer as especificações na área aeroespacial, nuclear e de defesa.

Especificamente a PRA, também conhecida como Análise Quantitativa do Risco – QRA (do inglês *Quantitive Risk Analysis*), iniciou-se nas décadas de 60 e 70 na indústria nuclear. A partir desse momento, tanto na área nuclear quanto em outras indústrias, tem-se utilizado diversas técnicas para estimar a probabilidade de falha de um sistema, assim como para analisar a

probabilidade de sequências de propagação destas falhas no sistema – cenário de falha – que conduziriam a um acidente ou uma consequência indesejada.

Na década dos 80, depois do acidente da planta nuclear de *Three Mile Island* nos Estados Unidos em 1979, foram definidos e estruturados alguns métodos para obter a quantificação do risco. Também, durante esta década, as crescentes exigências do mercado, principalmente em referência a menores preços e maior qualidade dos produtos, geraram a necessidade de encontrar alternativas para aumentar o desempenho dos processos e produtos. Este fato levou as empresas de manufatura e de serviços a usarem medidas de quantificação da confiabilidade para especificar um determinado desempenho e estabelecer políticas de garantia pós-venda (SIMKINS e BUKOWSKI, 1984; NIVOLIANITOU, AMENDOLA e REINA, 1986; LEE, 1988; ALE, 2002; KELLER e MODARRES, 2005; SINGPURWALLA, 2006).

Em outras palavras, até este momento, a análise de falha estava claramente delimitada e estabelecidos seus métodos de quantificação, porém, a análise quantitativa das consequências apenas começava. Já nos anos 90, a análise de risco foi usada para pesquisar sistematicamente a segurança operacional de sistemas empregados na indústria em geral, sendo consolidada uma ferramenta para a tomada de decisão em engenharia, negócios e finanças. Neste período, a engenharia contínuou aplicando a análise de risco em áreas como: indústria nuclear, transporte marítimo, aeroespacial, na indústria de petróleo e gás, no projeto de estruturas resistentes a tremores de terra, entre outras. Estas aplicações introduziram o conceito de incerteza e a necessidade de quantificar o risco de forma precisa e não só de forma qualitativa (RAVINDRA, 1990; COJAZZI, 1996; SHEIKH e AL-GARNI, 1996; GOOSSENS e COOKE, 1997; SANCHEZ, 2005).

Neste sentido, tornou-se fundamental discutir as fontes de incerteza e assim encontrar as alternativas para analisá-las. Ao longo da história, duas abordagens teóricas surgiram para entender as principais fontes geradoras de incerteza. A primeira defende que a origem da incerteza está na ausência de informações e trata a incerteza como um fenômeno subjetivo. Esta abordagem, entretanto, cedeu espaço na década de 80 à abordagem que enfatiza a falha de componentes críticos como a principal fonte geradora de incerteza. Em geral, as incertezas associadas à decisão provêm da dificuldade para determinar a ocorrência de um evento, como é apresentado nos trabalhos de Cheok *et al.* (1998) e Borgonovo e Apostolakis (2001).

Nas últimas décadas, observa-se uma evolução no sentido de se estabelecer uma medida de risco em função do sistema atingir um estado indesejável. Kaplan (1990), Siu e Kelly (1998) e Aven e Kvaloy (2002) apresentam os fundamentos para a estimação bayesiana e discutem alguns

desafios práticos do uso de métodos bayesianos na avaliação probabilística do risco em diferentes áreas da indústria. Jun et al. (1999) usam a abordagem bayesiana para estimar as taxas de falha em três níveis de consequências: menor, significativo e severo. Meel e Seider (2006) utilizam métodos bayesianos para estimar probabilidades de falha de sistemas de segurança crítica, bem como predizer as consequências das falhas nestes sistemas aplicando seus métodos em plantas de processos químicos. Kalantarnia et al. (2009) apresentam uma análise de risco completa para um tanque de armazenamento de produtos químicos. A análise compreende desde a identificação de cenários de risco até a estimação das probabilidades das consequências. Estes autores usam métodos determinísticos e análise bayesiana para fazer as suas estimações. Yun et al. (2009) desenvolvem um método chamado Bayesian-LOPA (Layer of Protection Analysis) como uma ferramenta de avaliação de risco usando métodos bayesianos para estimar os riscos potenciais em terminais de GNL (Gás Natural Liquefeito). Todos estes estudos desenvolvem modelos para quantificar a incerteza e incluí-la nos modelos de análise de risco, mas são estáticos ao percorrer a operação, pois embora apresentem métodos para o cálculo de uma probabilidade de falha que pode ser atualizada segundo evidências, não consideram outra característica dos sistemas de segurança crítica que é a mudança de estado no decorrer da operação.

Nesse mesmo sentido, Distefano e Puliafito (2009) analisam métodos tradicionais em análise de confiabilidade como diagrama de blocos e árvore de falhas para estudar sistemas complexos, dinâmicos e dependentes, e sua proposta é baseada em análise de Markov. Estes estudos mostram que a análise markoviana é uma ferramenta útil para conhecer a probabilidade do sistema permanecer em um determinado estado e a probabilidade deste mudar para um novo estado de operação em função de uma determinada taxa de transferência. Uma importante consideração a ser feita é que em sistemas complexos as probabilidades de estado e taxas de transferência entre estados, usualmente, são dinâmicas e obedecem a distribuições de probabilidade que não necessariamente são distribuições exponenciais. Portanto, incluir esta característica dinâmica dentro dos modelos torna-se um desafio que faz a análise mais complexa, porém em compensação mais aproximado à realidade.

#### 2.2.1.1. Indústria Naval

Neste setor as regulamentações estão relacionadas a diferentes aspectos da operação dos navios tais como: construção, navegação, trânsito em portos, trabalho da tripulação e segurança do navio, do meio ambiente e da tripulação, bem como da operação dos sistemas do navio e/ou auxiliares. As regulamentações visam garantir melhorias na previsão e controle de situações perigosas que poderiam resultar em incidentes. Estes regulamentos de segurança são basicamente

estabelecidos pela IMO (do inglês *Maritime Organization International*) e pelas sociedades classificadoras como a DNV (*Det Norsk Veritas*) e ABS (*American Bureau of Shipping*), entre outras.

Na abordagem determinística, muitas das especificações de projeto são baseadas na experiência passada e, muitas delas, após a ocorrência de algum acidente importante, são revisadas. Desta forma, em resposta ao acidente ocorrido na plataforma de produção de petróleo do Mar do Norte, *Piper Alpha*, em 1988, que resultou em 167 mortes, a divisão de segurança *offshore* da HSE (do inglês *Health and Safety Executive*) ordenou a revisão de toda a legislação de segurança de sistemas *offshore*. Consequentemente, em 1995, a IMO decidiu adotar uma metodologia estruturada para a análise e avaliação de segurança dos navios e do transporte marítimo chamada de FSA (do inglês *Formal Safety Assessment*) (KONTOVAS E PSARAFTINS, 2009).

Wang (2001) analisa as cinco etapas do FSA e discute sua aplicação no projeto e operação de navios. As cinco etapas são: 1) identificação dos perigos e dos cenários que poderiam conduzir aos acidentes tais como contato, colisão, explosão, incêndio, alagamento e afundamento; 2) pesquisa das causas e consequências dos cenários e identificação das áreas de maior risco. Nesta identificação normalmente são usadas técnicas como a matriz de risco; 3) definição de estratégias de controle de risco eficazes e práticas de operação visando reduzir o nível do risco nas áreas críticas; 4) avaliação do custo-benefício identificando e comparando os benefícios e os custos associados com a implantação das estratégias de controle do risco e 5) recomendações para a tomada de decisão.

Soares e Texeira (2001) discutem vários acidentes com navios e sistemas oceânicos estabelecendo uma avaliação global dos níveis de risco e sua diferenciação segundo o tipo de navio e o tipo de perda. Os autores também citam a utilização do FSA como ferramenta de apoio à tomada de decisões para cumprir a legislação existente para o transporte marítimo. Estes autores ressaltam que os passos da metodologia se enquadram na análise clássica de risco e o desafio está em aplicar este modelo ao projeto e operação de navios, incluindo o conhecimento de especialistas e probabilidades subjetivas no tratamento estatístico dos dados.

Por outro lado, Rosqvist e Tuominen (2004) advertem sobre a necessidade de quantificar cada um dos estágios associados ao FSA e apresentam alguns critérios para estabelecer medidas em cada uma das etapas do FSA. Assim, para a primeira etapa, propõem a utilização de métodos que usam regras de classificação para o risco. Na segunda etapa, é mencionada a necessidade de modelar as incertezas associadas ao risco, porém não é estabelecido o método para avaliá-las. Nas

duas etapas seguintes, é proposta a utilização de ferramentas de planejamento estratégico do tipo *stakeholder* (partes interessadas) e o estabelecimento de protocolos para avaliar o julgamento de especialistas. Embora a necessidade de quantificação seja levantada por estes autores, este trabalho traz uma proposta de avaliações qualitativas e o problema não tem uma abordagem quantitativa.

Eleye-Datubo, *et al* (2006) apresentam um modelo para avaliar o risco usando redes bayesianas como suporte para a tomada de decisão. Eles analisam dois casos da indústria naval, usando informações de navios canadenses. No primeiro caso, calculam a probabilidade de evacuação de uma plataforma offshore quando existe a possibilidade de colisão, incêndio, ou naufrágio. No segundo caso analisam a probabilidade de colisão entre um FPSO e um navio aliviador. Nos dois casos a decisão é tomada a partir da probabilidade resultante da rede bayesiana.

No âmbito da avaliação quantitativa, o trabalho de Hu *et al.* (2007) apresenta um modelo que usa a lógica *fuzzy* para determinar uma medida de risco relativo, concentrando-se especialmente nos critérios de frequência e severidade, na navegação de navios. Estes autores utilizam escalas para transformar a informação qualitativa existente nas bases de dados sobre acidentes, bem como a informação referente às frequências e severidades. Com estas transformações, conseguem converter as informações em fatores para o modelo que permite usar o conceito da matriz de risco. Embora a abordagem seja semiquantitativa, são utilizadas cinco escalas tanto para as frequências quanto para as consequências. No entanto, essas escalas são consideradas poucas e imprecisas para um sistema complexo de segurança crítica. Portanto, ressalta-se a importância da inserção dos métodos probabilísticos como parte integral da metodologia da PRA.

Na literatura podem ser encontrados alguns estudos que apoiam a modelagem probabilística de eventos indesejados na indústria naval, embora os modelos propostos não estejam inseridos como parte integral da metodologia da PRA. Neste contexto, Chen e Moan (2004) apresentam um modelo probabilístico para avaliar a colisão entre o navio aliviador e o FPSO. Em primeiro lugar, estes autores identificam as possíveis fontes e situações que causam a perda de posição do navio e em outro estágio analisam as possíveis atividades a serem executadas para recuperar a posição e evitar a colisão. O modelo probabilístico é um modelo simples que define a probabilidade de colisão como uma função dos dois estágios e depende totalmente de base de dados sobre acidentes, desconsiderando a informação que pode resultar da análise das máquinas e dos sistemas envolvidos.

Barros (2006) propõe um método híbrido entre redes bayesianas e processos de Markov para a análise de disponibilidade de sistemas complexos, baseado em um modelo de inferência para as taxas de falha e de reparo de um processo de Markov. Trucco *et al.* (2008) e Roed*et al.* (2009) discutem a aplicabilidade de métodos tradicionais de análise de risco combinados com redes bayesianas como ferramenta para a análise de risco na fase de projeto e planejamento da operação, especificamente na indústria *offshore*.

Roed *et al.* (2009) apresentam um modelo focado na fase operacional de operações *offshore.* Este estudo ressalta a importância de se analisar estes tipos de sistemas quando de sua operação para apoiar decisões na manutenção, porém deixam de lado a possibilidade de que o método apoie decisões em termos de mudanças estratégicas durante a operação. O método proposto por Roed *et al.* (2009) usa árvores de eventos e árvores de falha e, nos casos em que sejam necessários mais detalhes, propõe usar redes bayesianas visando a análise quantitativa, uma das principais dificuldades do FSA. Portanto, o método constitui-se em um interessante ponto de partida na abordagem da análise probabilística de sistemas complexos e de segurança crítica.

O trabalho de Kontovas e Psaraftins (2009) apresenta uma revisão crítica do FSA destacando que, embora seja o principal método científico para a análise de segurança marítima e para a formação de regulamentações, a quantificação de seus critérios em todas suas etapas ainda é um desafio nesta área.

No presente trabalho, considera-se que um caminho para abordar os desafios na área naval e dar resposta aos desafios que o FSA ainda importa aos pesquisadores pode estar nos modelos de avaliação probabilística de risco, especialmente os modelos que tratam sistemas complexos e dinâmicos, questão que começou a ser abordada recentemente. Assim, é possível criar novos modelos que estejam direcionados a estabelecer medidas probabilísticas para o risco e também possuam capacidade de estruturar sistematicamente o estudo de eventos indesejados, desde a identificação de eventos de perigos até a tomada de decisão. Neste sentido, observa-se um aumento significativo, na última década, das aplicações da avaliação probabilística de risco na área naval (HSE, 2002). Este fato é corroborado pelos estudos realizados por Crawley e Grant (1997) que propõem uma ferramenta de verificação que permite avaliar o risco de uma forma metódica, mas ainda com muitos aspectos qualitativos. Posteriormente, Falck, Skramstad e Berg (2000) e Rettedak, Aven, e Gudmestad (2000) discutem o uso da PRA no projeto de sistemas de produção e transporte de petróleo e gás. De Leon e Ortega (2004) e Yasseri e Prager (2004) propõem modelos para analisar a ocorrência de explosões em instalações *offshore*, usando bases de dados de acidentes, deixando de lado o comportamento específico das máquinas. Pula *et al.* 

(2005) discutem modelos físico-químicos para analisar a propagação de acidente, no caso de ocorrência de incêndio, radiação, sobrepressão, entre outros e, assim, analisar as consequências deste tipo de eventos indesejados em plataformas *offshore*.

Todos os trabalhos mencionados anteriormente são aproximações direcionadas a resolver os desafios que ainda tem este tópico na industrial naval, porém a característica dinâmica tem sido muito pouco abordada nesta área específica. Neste sentido, existem alguns trabalhos desenvolvidos em outras áreas que podem ser de interesse. Recentemente, na área química, Ferdous *et al.* (2007) apresentam uma metodologia para avaliar árvores de falha dinâmicas e estáticas como ferramenta para avaliar probabilisticamente o risco. Kalantarnia, Khan e Hawboldt (2009) analisam a importância de que a avaliação do risco seja dinâmica e propõem uma metodologia para a PRA para tentar abordar as características dinâmicas dos sistemas complexos. A metodologia apresentada por estes autores aborda a avaliação dinâmica da falha, mas permanece aberta a questão dinâmica das consequências pelas possíveis mudanças nas condições iniciais e ações baseadas na tomada de decisão.

Outro aspecto na análise da PRA refere-se às primeiras etapas, onde torna-se fundamental aplicar métodos de identificação de riscos indutivos baseados no princípio de que os acidentes acontecem como consequência da perda de controle de algumas das variáveis de um processo, em relação aos parâmetros normais de operação. Assim, em cada subsistema devem ser identificados os nós ou pontos claramente localizados no processo e definidas, de forma sistemática, as diferentes variações existentes nas variáveis de interesse. Neste contexto, os métodos aplicados, embora qualitativos, devem estabelecer, de maneira lógica, o encadeamento das falhas de um sistema facilitando a elaboração da análise probabilística. Dentre as técnicas comumente usadas estão: Análise Preliminar de Perigos – PHA, Análise de Modos e Efeito de Falhas – FMEA, Análise Causa-Consequência, HAZOP, entre outras (KHAN e ABBASI, 1997; ANDREWS e RIDLEY, 2001; MEEL e SEIDER, 2006; RODRIGUEZ, SOUZA e MARTINS, 2009; DUJIM, 2009, CARAZAS e SOUZA, 2010 e ROSSING, *et al.*, 2010).

Diante do exposto, é possível perceber que ainda é um desafio o desenvolvimento de modelos que avaliem probabilisticamente o risco e que tenham capacidade de incluir os efeitos das mudanças repentinas nas condições de operação. Além disso, é também um desafio que estes modelos sejam parte da estrutura de métodos para a tomada de decisão. A seguir, são explorados os conceitos básicos e elementos necessários para desenvolver a avaliação probabilística do risco.

#### 2.2.2. Conceitos Básicos

A PRA pode ser definida como um método de análise abrangente, estruturado e lógico para identificar e avaliar o risco em sistemas complexos, como uma proposta de custo eficiente visando melhorar o desempenho e a segurança (STAMATELATOS, 2002). Esta metodologia pesquisa sistematicamente características operacionais e de segurança e envolve o desenvolvimento de modelos que descrevam a resposta do sistema e de seus componentes quando existem eventos iniciadores que podem desencadear um acidente. Wu e Apostolakis (1992) ressaltam que a PRA deve considerar as consequências dos acidentes que são potencialmente mais severas e eventos raros e, portanto, a metodologia deve incluir as incertezas associadas à ocorrência. Por esta razão, podem-se identificar dois objetivos principais quando é desenvolvido a PRA:

- Identificação de cenários e sequências de acidentes que geram potenciais consequências indesejadas; e
- 2. Quantificação da incerteza associada com a ocorrência dos cenários.

Desta forma, torna-se fundamental definir o risco, bem como outros conceitos que estão associados a este, para, posteriormente, definir as etapas, elementos e metodologias envolvidas em uma avaliação probabilística do risco.

#### 2.2.2.1. Risco

Haimes (1998) define o risco como a medida que combina a probabilidade e a severidade dos efeitos associadas à ocorrência de eventos indesejados sobre um sistema. Por outro lado, Sánchez (2005) define o risco como a magnitude de um evento de falha, usualmente expressa em termos econômicos. De forma mais geral, o risco pode ser definido como uma medida resultante da combinação entre as frequências de ocorrência de eventos indesejados  $p_i$  e a magnitude das perdas que podem ser entendidas como danos ou consequências  $c_i$ , como se observa na eq. (2.1).

$$Risco = f(p_i \cdot c_i) \tag{2.1}$$

Para muitos sistemas, as consequências, após a ocorrência de um evento indesejado, são extremamente graves e podem ser expressas em número de fatalidades, tempo de perda de produção, volume de perda de produção, quantidade de produto contaminante liberado ao meio ambiente, multas e punições por não cumprimento de contratos e legislações governamentais, entre outros.

Neste contexto, supondo que exista uma variável aleatória que represente as perdas referentes às consequências de um determinado evento indesejado, o valor esperado desta variável pode ser interpretado como o risco que existe se o evento indesejado acontecer e está expresso na eq. (2.2) (TODINOV, 2006).

$$Risco = E[L] = \sum_{i=1}^{n} p(L_i) L_i$$
 (2.2)

onde  $p(L_i)$  representa a probabilidade da ocorrência da perda, ou seja é a probabilidade do evento indesejado acontecer, sendo  $L_i$  o valor desta perda.

Introduzir a medida de risco baseada na distribuição das perdas potenciais permite incorporar a incerteza associada às consequências. Por outro lado, para estimar a distribuição de perdas podem ser usados dados históricos sobre as perdas associadas com a ocorrência de eventos indesejados. Além disso, podem existir diferentes níveis de perdas associadas às diversas alternativas de decisão, onde estas alternativas representam a redução da chamada ocorrência de  $L_i$ . Portanto, define-se um conjunto A, de possíveis alternativas, onde cada alternativa é mutuamente excludente, e a probabilidade de cada nível de perdas pode ser expressa como mostra a eq. (2.3) e, portanto, o risco pode ser expresso como mostra a eq. (2.4) (SANCHEZ, 2005).

$$p(L_i) = \sum_{j=1}^m p(L_i|A_j) \cdot p(A_i)$$
(2.3)

$$p(L_i) = \sum_{j=1}^{m} p(L_i|A_j) \cdot p(A_i)$$

$$Risco = E[L] = \sum_{i=1}^{n} \left[ \sum_{j=1}^{m} p(L_i|A_j) \cdot p(A_i) \right] \cdot L_i$$

$$(2.3)$$

#### 2.2.2.2. Sistema complexo

Um sistema pode ser definido como uma unidade global organizada de inter-relações entre elementos, ações e indivíduos. Um sistema complexo é definido pela combinação ou inter-relação de hardware, software, pessoas, operações e ambiente, cujo ciclo de vida envolve projeto, desenvolvimento, testes, produção, operação e manutenção. Dependendo do sistema, a forma como estes elementos interagem pode ser de difícil previsão (LEITE, 2004). Portanto, o sistema complexo possui dois ou mais elementos diferentes, os quais estão conectados e o comportamento desta interação não é facilmente previsível. O comportamento imprevisível torna-se ainda mais aparente na dinâmica do sistema quando ele interage com outros. Além disso, no decorrer do tempo, o sistema pode mudar de estado. A evolução do sistema não pode ser dirigida e, portanto, o gerenciamento do comportamento do sistema complexo é difícil de ser obtido (GUILLERM E DEMMOUN, 2010).

Desta forma, um sistema complexo é caracterizado por um conjunto de elementos estruturados e por meio de relações que permitem a comunicação entre os elementos, sendo que tais relações estão caracterizadas por parâmetros e funções. Além disso, para definir um sistema é preciso definir os limites das condições reais ou imaginárias que definem o alcance do sistema.

Em geral, pode-se afirmar que um sistema complexo é constituído por uma grande variedade de componentes ou elementos, com funções específicas e comportamentos variados, além de que os elementos que compõem estes tipos de sistemas estão em constante evolução e são influenciados por eventos indesejados que não podem ser previstos com certeza. Outra característica dos sistemas complexos é que a informação sobre o estado de todos os elementos do sistema não pode ser conhecida completamente e que os diversos elementos estão unidos por uma grande variedade de interações que determinam o comportamento do sistema. Estas interações são dinâmicas e normalmente são não lineares (DEKKER, CILLIERS e HOFMEVR, 2011).

Baseado nas características de seus componentes pode-se estabelecer que o sistema possua atributos essenciais denominados como variáveis de estado do sistema, as quais normalmente dependem do tempo, ou seja, o estado das variáveis pode mudar no tempo e estas mudanças definem a trajetória de estado do sistema.

# 2.2.2.3. Segurança

Segurança é definida como a capacidade de um sistema de evitar a ocorrência de falhas ou eventos indesejados, dentro de condições pré-estabelecidas de eventos críticos para o seu funcionamento ou catastróficos para seus operadores e meio ambiente. Este conceito, no contexto do risco, está relacionado à operação bem sucedida do sistema. Portanto, a segurança de operação do sistema está relacionada com as capacidades de avaliação, previsão, medida e controle de falhas no sistema (BAHR, 1997). A segurança também pode medir a capacidade de operar sem falhas catastróficas e, portanto, reflete a capacidade do sistema operar de forma normal e anormal, sem oferecer ameaças às pessoas ou ao ambiente. A confiabilidade e segurança podem estar relacionadas quando a segurança depende do funcionamento de um dispositivo de proteção (FORTUNE, 1995).

Para Casal (2008), na caracterização da segurança da operação, passam a ser muito relevantes conceitos como o desempenho específico e análise de probabilidade de falha. No entanto, autores como Rushby (1994), Leveson (2004) e Cambacedes e Bouissous (2010) afirmam que a segurança de sistemas não requer que os componentes do sistema demonstrem alta confiabilidade, mas apenas que um conjunto de comportamentos perigosos não ocorra, já que afirmam que

dispositivos de proteção deveriam ser os últimos recursos a serem empregados na ordem de precedência da segurança, devendo-se dar preferência à eliminação dos perigos.

## 2.2.2.4. *Perigo*

Para Kumamoto e Henley (1996), um perigo corresponde a uma ou mais condições físicas ou químicas com potencial para causar danos às pessoas, à propriedade, ao meio ambiente ou a uma combinação desses. Esta definição corresponde a uma situação bem abrangente, pois esta pode se referir às situações de perigo de natureza aleatória, de origem natural, tecnológica ou econômica, assim como às de natureza determinística, relacionadas com ações intencionais.

Para Wang e Roush (2000), este conceito está baseado somente nas consequências potenciais de um evento indesejado e desconsidera a frequência da ocorrência do evento. Estas consequências podem ser classificadas por uma escala hierárquica de gravidade ou severidade e, portanto, um perigo terá uma maior magnitude em função das severidades das consequências associadas a este.

#### 2.2.2.5. *Acidente*

Bahr (1997) define acidente como um processo não planejado de eventos que conduz a um dano na propriedade, nos equipamentos ou no meio ambiente, bem como que pode causar lesões ou morte de pessoas. O acidente é inesperado e não planejado e corresponde a um evento indesejado que impede que sejam executadas tanto as operações que estão sendo realizadas no momento como aquelas que estavam planejadas para acontecer depois.

Em muitas ocasiões, os acidentes são o resultado de uma longa sequência de eventos e, frequentemente, estes eventos da sequência já ocorreram antes do acidente acontecer. Portanto, se um ou vários eventos desta sequência forem prevenidos, o acidente pode ser evitado ou suas consequências minimizadas.

Existe uma relação direta entre perigo e acidente como mostra a Figura 2.1. Esta relação pode ser explicada já que um acidente é um evento concreto que ocorreu e, consequentemente, há morte, danos ou perdas, enquanto que o perigo é uma condição potencial que pode resultar em morte, danos ou perdas. Portanto, o perigo é um pré-requisito para que aconteça um acidente (ERICSON, 2005).

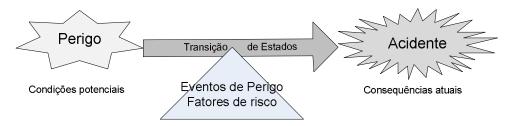


Figura 2.1 Relação entre perigo e acidente (ERICSON, 2005).

Em termos desta relação existem três componentes básicos no desenvolvimento de um acidente: 1) o elemento perigoso é o que corresponde ao recurso básico que pode criar o impulso para o acidente como, por exemplo, uma fonte de energia, como explosivos utilizados no processo produtivo; 2) o mecanismo de início é o gatilho do evento iniciador, cuja ação transforma o perigo potencial em acidente; 3) a população ameaçada é representada por pessoas ou elementos vulneráveis que possam sofrer uma lesão ou dano e define a severidade da ocorrência do evento indesejado (ERICSON, 2005).

# 2.2.2.6. Sistema de segurança crítica

Um sistema de segurança crítica (*Safety Critical System*) é definido como aquele sistema no qual um mau funcionamento pode ter consequências muito sérias ou até catastróficas como a perda de vidas humanas, danos ao meio ambiente, danos materiais expressivos, ou ainda, danos à reputação da empresa (ERICSON, 2005).

Em sistemas de segurança crítica, a segurança faz parte dos objetivos do sistema, ou ainda, parte das restrições que o sistema precisa respeitar. No primeiro caso, uma das funções do sistema é garantir que acidentes não aconteçam. No segundo caso, o sistema precisa atingir seu objetivo sem que acidentes ocorram (HATTON, 1995). Um sistema que não controle ou interaja com dispositivos físicos e que não processe dados críticos não é de segurança crítica. Assim, por exemplo, um navio petroleiro é um amplo sistema com operações, subsistemas de armazenamento de carga, subsistemas elétricos e mecânicos, estruturas que interagem com sistemas de segurança e condições ambientais, criando relações de dependência entre os subsistemas e, portanto, pode ser classificado como um sistema complexo de segurança crítica (COWING, PATE-CORNELL e GLYNN, 2004).

# 2.2.3. Componentes da Análise Probabilística de Risco

Uma análise probabilística de risco é uma atividade voltada para o desenvolvimento de estimativas quantitativas do risco, baseadas em técnicas estruturadas que têm um componente qualitativo, para promover o entendimento da combinação das frequências e das consequências de um acidente. Esta combinação é composta por diversas etapas, dependendo

da natureza da análise, especialmente em sistemas complexos e, para atender à necessidade de quantificar um potencial modo de falha, a análise deve responder basicamente às seguintes perguntas (STAMATELATOS, 2002):

- O que pode dar errado na operação do sistema?
- Quais são as frequências de ocorrência das falhas que podem gerar um acidente?
- Quais são as consequências da ocorrência da falha?

Stamatelatos (2002) estabelece que estas três perguntas são as que dão origem a três dos componentes fundamentais na avaliação do risco: Modelagem dos Cenários de Risco, Avaliação da Probabilidade de Ocorrência dos Cenários de Risco e Avaliação de Consequências dos Cenários de Risco. Na intenção de dar resposta a estas perguntas estruturou-se o fluxograma apresentado na Figura 2.2 que corresponde ao escopo geral da análise probabilística do risco, onde são observados os estágios que permitirão dar respostas às perguntas acima. A partir destas respostas, o analista poderá tomar decisões sobre o processo ou sobre as atividades que minimizem o risco, seja pela mitigação das causas de uma falha ou pelo contingenciamento das consequências.

Na abordagem tradicional, o processo de decisão, embora esteja incluso indiretamente em algumas áreas como na nuclear, não aparece de forma explícita nos componentes da PRA e normalmente não se utiliza a teoria estatística para realizar o processo de tomada de decisão. O autor do presente trabalho considera que este processo deve aparecer como parte da análise probabilística de risco e que a metodologia de tomada de decisão, usando a teoria estatística, corresponde também a processos estruturados e sistemáticos. Assim, aparece o quarto componente da avaliação probabilística do risco: Análise de Decisão.



Figura 2.2 Fluxograma da Avaliação Probabilística do Risco.

Em resumo, neste trabalho são definidas Modelagem dos Cenários de Risco, Avaliação da Probabilidade de Ocorrência dos Cenários de Risco, Avaliação de Consequências dos Cenários de Risco e Análise de decisão como as quatro componentes da análise probabilística de risco. Na seção a seguir será apresentada uma revisão das principais técnicas que apoiam estes quatro componentes. Em geral, são métodos que consideram tanto a avaliação do risco, quanto a sua quantificação.

# 2.3. TÉCNICAS DE QUALIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DO RISCO

A diferença principal entre a análise qualitativa do risco e a avaliação probabilística está em que esta última utiliza princípios estatísticos e leis de probabilidade para quantificar a chance de ocorrência de cada um dos eventos que compõem o cenário de risco. Portanto, sua análise pode chegar até a estudar sistemas com eventos raros e/ou que incluam a opinião de especialistas. Embora as ferramentas utilizadas no primeiro tipo de análise sejam qualitativas, estas são estruturadas e sistemáticas e provêm informações diretas que se tornam entrada para as técnicas usadas nos outros três componentes da análise quantitativa. A seguir, são apresentadas as técnicas mais utilizadas para a identificação, caracterização e definição da PRA, expondo as características, vantagens de cada técnica, bem como a metodologia e procedimentos para sua execução e avaliação de resultados.

# 2.3.1. Técnicas de Análise de Risco

Existem métodos que auxiliam a análise estruturada e lógica da informação visando caracterizar o sistema do ponto de vista do risco. Embora estes métodos se caracterizem por não fazer uso de cálculos numéricos, alguns apresentam metodologias de obtenção de medidas de risco. No entanto, o ponto forte está na identificação do sistema e dos objetivos do risco. Portanto, a aplicação destes métodos apoia a modelagem dos cenários de risco e não a sua quantificação. As técnicas ou métodos baseiam-se na utilização da experiência adquirida em operação de sistemas ou equipamentos similares, assim como na análise das características destes.

#### 2.3.1.1. Análise Funcional

O objetivo desta técnica é traduzir a estrutura física do sistema em uma estrutura hierárquica que permite relacionar de forma lógica a interligação funcional entre os componentes que formam o sistema, representando a operação do sistema sob análise (CARAZAS e SOUZA, 2010).

Este método permite identificar os perigos do sistema através da análise das funções, uma vez que as funções são o meio pelo qual o sistema realiza sua missão e seu objetivo operacional. Este método é também a fase preliminar para outros estágios da metodologia da PRA como, por exemplo, na identificação de eventos de perigo, através da avaliação dos impactos na segurança das funções que não estejam sendo cumpridas corretamente. Autores como Modarres e Cheon (1999), Stamatelatos (2002) e Papazoglou e Aneziris (2003) nomeiam esta técnica como Diagrama Lógico Mestre (*Master Logic Diagram*).

Esta técnica pode ser aplicada para analisar todos os tipos de sistemas. O nível de detalhe da análise pode variar dependendo do nível de funções a serem analisadas. A análise funcional é representada por um gráfico, denominado árvore funcional, que tem uma estrutura hierárquica, não uniforme, formada por ramos (Figura 2.3). Cada ramo representa uma separação da função principal em outras funções que são necessárias para garantir que a função principal seja realizada (ERICSON 2005).

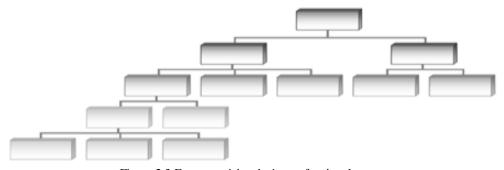


Figura 2.3 Estrutura típica de árvore funcional.

No topo da árvore está a função principal do sistema e no nível seguinte aparecem as funções que apoiam diretamente a função topo. Por sua vez, cada subfunção pode ter novas funções de apoio e assim o processo segue até chegar aos componentes básicos de cada sistema.

Para desenvolver o método é necessário definir claramente as funções do sistema e, para isto, é necessário estabelecer as atividades que o sistema desempenha do ponto de vista operacional.

Autores como Carazas (2006) e Casal (2008) têm utilizado esta técnica como parte de análise de confiabilidade e disponibilidade, ressaltando a potencialidade da mesma para uma análise preliminar de sistemas sob enfoque da falha. Ainda em relação à elaboração da árvore funcional, autores como Krishnazamy *et al.* (2005; 2008) e Fujiyama *et al.* (2004) afirmam em suas análises que a elaboração de uma árvore funcional é a primeira etapa para uma análise de riscos bem sucedida, afirmação esta que, supõe-se, nasceu da experiência de tentar modelar sistemas complexos.

# 2.3.1.2. Matriz de Dependências

Outro técnica utilizado para determinar as relações entre as funções dos componentes de um sistema é a matriz de dependências. Este método descreve como, do ponto de vista operacional, os subsistemas suportam uns aos outros e, portanto, uma falha ocorrida nos primeiros subsistemas tornará indisponível os próximos ou subsequentes, embora estruturalmente não estejam ligados diretamente. Esta técnica apoia o desenvolvimento de cenários de falha, já que permite que o analista perceba subsistemas causadores de falhas em outros subsistemas (STAMATELATOS, 2002).

Este conceito pode ser ilustrado considerando um exemplo simples de um reservatório composto por um tanque e um respirador (Figura 2.4). Assim, se o respirador falhar pode causar uma sobrepressão no tanque que pode causar a explosão deste, portanto, o sistema respirador é suporte do sistema tanque.



Figura 2.4 Matriz de dependência.

A matriz é lida coluna por coluna, onde o sistema listado no topo da coluna é suportado pelo sistema da linha que aparece marcado com 'X'. A elaboração da matriz de dependência permite que o analista entenda as dependências funcionais entre os sistemas.

Autores como Chen, Ling e Chen, (2003), Danilovic e Browning (2007) e Tang, *et al.* (2010) usam esta técnica para a representação simples, compacta e visual de sistemas complexos que auxilia na solução de problemas de decomposição e integração, bem como no projeto de novos produtos.

# 2.3.1.3. Análise Preliminar de Perigos – PHA

PHA (do inglês *Preliminary Hazard Analysis*) é uma técnica indutiva e estruturada que permite avaliar qualitativamente os potenciais perigos, no sistema, sua causa e consequência, bem como, o nível de risco e as ações de mitigação e de contingência em caso de ocorrência de alguma falha. Esta metodologia pode ser empregada para sistemas na fase inicial do projeto, quando

apenas os elementos básicos do sistema e os materiais estão definidos, ou como uma revisão geral de segurança de sistemas já em operação (ERICSON, 2005).

A análise consiste em listar e escolher eventos de perigo e definir as consequências de sua ocorrência, assim como determinar suas causas. Para realizar este objetivo, utiliza como entrada a informação sobre a identificação e caracterização do sistema. Para a realização da análise, o processo em estudo deve ser dividido em etapas segundo o desenvolvimento da operação ou os objetivos definidos na etapa de identificação e caracterização do sistema. A informação resultante da análise deve ser registrada de forma sistemática e, portanto, é proposta a planilha apresentada na Figura 2.5.

					CAUSA		CONSEQUÊNCIA				CLASSIFICAÇÃO DO RISCO					
FASE	EVENTO DE PERIGO	DESCRIÇÃO DE EVENTO	TIPO DE NAVIO	DESCRIÇÃO DA CAUSA	FREQUÊNCIA	AÇÃO DE MITIGAÇÃO	LOCAL (aliviador)	OPERAÇÃO OFFLOADING	AÇÃO DE CONTINGÊNCIA	SEG. PESSOAL	EQUIPAMENTO	AMBIENTAL	SEG. PESSOAL	EQUIPAMENTO		OPERAÇÃO OFFLOADING

Figura 2.5 Planilha PHA.

Na Figura 2.5 a primeira coluna designa a fase específica da operação que se está analisando. Na sequência, é definida uma ou mais condições físicas com potencial para causar danos às pessoas, à propriedade, ao meio ambiente ou à combinação destes, seguida da explicação de como se manifesta o evento de perigo e da definição de algumas características especiais deste.

Na análise das causas, pretende-se identificar o porquê da ocorrência do evento de perigo, sendo esta composta pela descrição, frequência e ação de mitigação. A descrição da causa corresponde a uma ou mais condições físicas que originam o evento de perigo. A frequência apresenta de forma qualitativa qual é a possibilidade de ocorrência da falha, sendo definidas cinco categorias: Extremamente Remota (A), Remota (B), Pouco Provável (C), Provável (D) e Frequente (E), definidas conforme a Tabela 2.1. E, finalmente, define-se a ação de mitigação, que descreve o conjunto de atividades que podem ser efetuadas para manter os sistemas cumprindo as suas funções e reduzir a possibilidade da ocorrência do evento de perigo.

Tabela 2.1 Classificação da frequência de ocorrência de eventos de perigo (CORREA et al., 2006).

Categoria		Frequência	Características
Extremamente Remota A		Mais de 1 em 100.000 anos	Sem referência histórica
Remota	В	Mais de 1 em 1.000 anos	Não é esperado ocorrer durante a vida útil da instalação, apesar de haver referências históricas
Pouco provável	C	Mais de 1 em 30 anos	Possível de ocorrer durante a vida útil
Provável	D	Mais de 1 em 10 anos	Acontece mais de uma vez durante a vida útil
Frequente	E	Mais de 1 por ano	Acontece muitas vezes durante a vida útil

A análise das consequências define os efeitos que teria o evento de perigo sobre o sistema, definindo-se como efeito uma condição de operação fora da especificação inicial da missão. Neste item, a consequência é inicialmente avaliada em duas categorias, local e na operação. A primeira explica como seria afetado o equipamento no caso de acontecer o evento de perigo e a segunda se refere a como seria afetada a operação do sistema no caso de acontecer o evento de perigo.

Em sistemas de segurança crítica é recomendável que as consequências estejam definidas para o maior número de ativos possíveis. Assim, por exemplo, a Tabela 2.2 apresenta a definição das consequências definidas para três ativos: segurança pessoal, instalação e meio ambiente (CORREA *et al.*, 2006).

Tabela 2.2 Classificação de consequências (CORREA, et al., 2006).

		Segurança Pessoal (Perigo para a saúde humana)	Instalação	Ambiental (Danos Fauna e Flora)
I	Muito reduzidas	Nenhum dano visível ou máximo de primeiros socorros	Sem danos ou danos insignificantes a equipamentos	Invisíveis ou mínimos
II	Reduzidas	Ferimentos leves em empregados e sem lesões extramuros	Danos leves controláveis ou com reparação de baixo custo	Poluição desprezível, danos considerados toleráveis entre nível mínimo e médio
III	Médias	Ferimentos graves ou múltiplos em empregados e Ferimentos leves em pessoas extramuros	Danos severos	Poluição localizada, curto período, danos considerados toleráveis de nível médio.
IV	Graves	Lesões graves ou Fatalidade em empregados e em pessoas extramuros	Danos irreparáveis, com reparação lenta ou impossível	Poluição de grande área, longo período. Níveis acima dos máximos toleráveis

Posteriormente, segue a definição da ação de contingência onde é preciso listar as recomendações de ações de emergência visando evitar ou minimizar a propagação da consequência ou a redução da gravidade das mesmas. E, por último, é definida uma escala numérica que define a gravidade dos efeitos que teria o evento de perigo. Caso aconteça, este deve estar definido para os ativos considerados fundamentais no sistema. Esta escala é cruzada com a escala das probabilidades e é estabelecida a categoria de risco em que o evento de perigo está. Em algumas ocasiões, esta categorização do risco é realizada usando a matriz de risco como mostra a Figura 2.6.

			CATEGOR	IAS DE FRE	QÜÊNCIA	
		Α	В	С	D	E
NDE	ΛΙ	MÉDIO	MÉDIO	NÃO TOLERÁVEL	NÃO TOLERÁVEL	NÃO TOLERÁVEL
SEVERIDADE	=	MÉDIO	MÉDIO	MÉDIO	NÃO TOLERÁVEL	NÃO TOLERÁVEL
:VEI	II	TOLERÁVEL	TOLERÁVEL	MÉDIO	MÉDIO	MÉDIO
SE	ı	TOLERÁVEL	TOLERÁVEL	TOLERÁVEL	TOLERÁVEL	MÉDIO

Figura 2.6 Matriz de Risco (RODRIGUEZ, SOUZA e MARTINS, 2009).

Deste modo, na aplicação da PHA são levantadas as causas que podem induzir a ocorrência de cada um dos eventos e as suas respectivas consequências, sendo, então, elaborada uma avaliação qualitativa da frequência de ocorrência do cenário de acidentes, da severidade das consequências e do risco associado. Portanto, os resultados obtidos são qualitativos, não fornecendo estimativas numéricas (AGUIAR, 2008), e portanto somente fornece estimativas qualitativas do risco, como mostra Correa *et al.* (2006). Esta técnica torna-se fundamental para fazer análises iniciais, visando a identificação dos eventos de perigo, em diversos campos de atuação. Portanto, como ferramenta inicial da PRA, na etapa de identificação de perigos, o uso da técnica PHA é de grande utilidade, como mostra Rodriguez, Souza e Martins, (2009).

## 2.3.1.4. Análise de Modos e Efeitos de Falha – FMEA

A análise do tipo FMEA (do inglês *Failure Modes and Effect Analysis*) é uma técnica usada para identificar os pontos vulneráveis que um sistema pode ter, estudando o projeto do sistema ou sua operação, e até mesmo o planejamento da manutenção.

Para aplicar esta metodologia é preciso enumerar os possíveis modos de falha de cada um dos componentes que fazem parte do sistema em análise, considerando as características de operação dos mesmos, bem como definir as consequências associadas à ocorrência de cada um destes modos de falha. Uma vantagem da análise tipo FMEA é a geração de uma documentação bastante detalhada sobre o processo.

Esta análise identifica processos críticos permitindo verificar componentes e subsistemas que devem receber atenção especial. A análise do tipo FMEA é baseada nas cinco questões apresentadas a seguir, que pretendem dar diretrizes gerais para a sua elaboração (LEWIS, 1987).

- 1. Quais são os modos de falha dos componentes e/ou operações?
- 2. Quais são os efeitos destas falhas sobre o sistema?
- 3. Quão severos são estes efeitos?
- 4. Como detectar a falha?
- 5. Quais as medidas contra estas falhas, que evitam ou minimizam os seus efeitos?

A primeira questão auxilia a identificação de cenários de falha. Na segunda questão, se estabelece como falhas nas operações e falhas dos equipamentos afetam a operação, visando evitar que as falhas causem perda de funcionalidade do sistema. Para responder à terceira pergunta, pode-se usar a Tabela 2.2, ou outras escalas como, por exemplo, a utilizada pela norma MIL-STD-1629A que define quatro categorias de severidade: i. Catastrófica; ii. Crítica; iii. Marginal e iv. Menor (SOUZA, 2003). Na sequência, a quarta questão avalia os diferentes métodos e mecanismos que existem para detectar a falha, assim, por exemplo, as técnicas de monitoração podem ser utilizadas para registrar os parâmetros operacionais dos processos, sendo que a variação nos mesmos pode ser indicativa do processo de desenvolvimento de uma falha. A última pergunta tem como objetivo sugerir atividades que evitem a ocorrência de falha e minimizem os efeitos associados a esta ocorrência (ERICSON, 2005).

Na literatura, encontra-se uma ampla gama de aplicação desta técnica em diversas áreas, como por exemplo, indústria de alimentos, informática, controle, análise de sistemas mecânicos, entre outras. Todas estas aplicações têm o intuito de analisar a confiabilidade do processo, selecionar componentes críticos e propor atividades para diminuir sua frequência de falha (SCIPIONI, et al., 2002; CARDOSO, 2004; CARAZAS, 2006; KORAYEM e IRAVANI, 2008; e OLDENHOF, *et al.*, 2011).

# 2.3.2. Técnicas de Avaliação de Risco

#### 2.3.2.1. Análise da Árvore de Falha (FTA)

A FTA (do inglês *Fault Tree Analysis*) é um método gráfico que avalia a probabilidade de falha de sistemas, visando determinar as causas raízes e a probabilidade de ocorrência dos eventos de perigo. Este evento de perigo é chamado de evento de topo e pode ser associado com o comportamento anormal do sistema, causado por uma falha. As causas raízes são determinadas

através da análise dos sintomas e das relações que estes têm com os componentes, subsistemas ou eventos que poderiam tê-los causado. Esta técnica pode ser usada tanto para a avaliação qualitativa como para a quantitativa do risco, sendo que a segunda necessariamente inclui a primeira.

A avaliação qualitativa permite uma compreensão das possíveis maneiras de como o sistema pode falhar e, portanto, determinar quais serão as medidas que podem ser tomadas para minimizar os efeitos e as consequências do evento indesejável. A finalidade da análise qualitativa é determinar a origem do problema ou evento topo (ALVES e DENCKER, 2002; WALKER e PAPADOPOULOS, 2009).

Na avaliação quantitativa, as falhas do sistema são gradualmente divididas em níveis hierárquicos até alcançar um nível de detalhe que o sistema ou estudo requer, do mesmo modo em que são estudadas as relações lógicas dos diferentes subsistemas e componentes para determinar, por meio de análise probabilística, a chance de um evento indesejado acontecer. Frequentemente, a maior dificuldade para a elaboração da árvore de falhas é a seleção do evento topo a ser estudado. Assim, para a montagem da árvore de falhas, há uma lógica a ser levada em consideração, pois um sintoma necessariamente tem um número finito de causas as quais ocasionam a parada do sistema; estas causas devem ser pesquisadas e determinadas com precisão e normalmente estão relacionadas a falhas em algum dos componentes do sistema. O objetivo da construção de qualquer diagrama do tipo árvore é elaborar uma estrutura lógica para definir sua "raiz" ou origem do problema (SOUZA, 2003).

Na elaboração da árvore de falhas, há uma lógica a ser observada, pois um sintoma necessariamente tem um número finito e conhecido de causas. Usando um processo dedutivo, as causas dos eventos indesejados são descobertas e são estabelecidos os eventos funcionais que podem causar uma falha indesejada, assim como as relações lógicas de eventos básicos (KUMAMOTO e HENLEY, 1996).

O procedimento é repetido até todos os eventos serem completamente desenvolvidos e os eventos básicos encontrados, visando, assim, ilustrar graficamente as diferentes combinações e sequências dos eventos que conduzem ao evento topo. Cabe ressaltar que a estrutura padronizada potencializa o componente visual deste método. Os eventos são representados por símbolos (Tabela 2.3) e portões lógicos (Tabela 2.4).

Para o processo de avaliação, em cada portão lógico usado, todas as entradas devem ser suficientes e necessárias para produzir a saída do evento. A análise quantitativa procura atribuir aos eventos de nível mais básico probabilidades de falha a partir de: dados técnicos da literatura,

análise dos históricos de falha, manuais do fabricante, ou empresas que utilizam sistemas similares.

Tabela 2.3 Símbolos dos Eventos da FTA (adaptado de GRANT e COOMBS, 1996).

Símbolo	Significado
	Eventos que são saídas de portas lógicas
	Eventos associados a falhas básicas
$\Diamond$	Eventos não realizados (omitidos)
	Parâmetro associado a um evento que deve ser montado
	Evento condicional, usado em janelas de inibição
$\triangle$	Indica a conexão com outro símbolo ou evento

Tabela 2.4 Representação dos conectores (portões) lógicos em uma árvore de falha (adaptado de GRANT e COOMBS, 1996).

Símbolo	Nome	Descrição
	E	Evento de saída só ocorre se todos os eventos de entrada ocorrem
	OU	Evento de saída ocorre se pelo menos um dos eventos de entrada ocorrer
-	INIBIÇÃO CONDICIONAL	Evento de entrada só conduz ao evento de saída se o condicional ocorrer
	E DE PRIORIDADE	Evento de saída ocorre se os eventos de entrada ocorrer em na ordem de esquerda para direita
	OU EXCLUSIVO	Evento de saída ocorre se só um evento de entrada ocorrer
m	M DE N	Evento de saída ocorre se M de N dos eventos de entrada ocorrerem

A partir da aplicação de teoremas de probabilidade, considerando as indicações dos portões lógicos, pode-se calcular a probabilidade de ocorrência do evento falha principal. Na Figura 2.7 é apresentado um exemplo ilustrativo de árvore de falha, com cálculo de probabilidade de evento topo, em que a avaliação desta probabilidade é realizada através das leis de probabilidade (SOUZA, 2003).

A complexidade da árvore de falhas cresce com a complexidade do equipamento ou processo bem como com o nível de detalhamento desejado. Muitas vezes, ao analisar um sistema, será útil utilizar programas computacionais no desenvolvimento da FTA. É importante considerar que árvores de falha que abordam um mesmo evento topo podem ser diferentes entre si, então pode ser útil combinar várias árvores, consolidando o conhecimento sistematizado por diferentes pessoas ou equipes (STAMATELATOS, 2002).

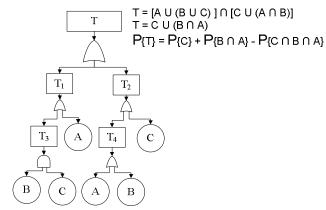


Figura 2.7 Exemplo de Solução de Árvore de Falha (SOUZA, 2003).

Quando as relações entre os eventos de uma árvore são independentes, aplica-se álgebra de Boole para avaliar a probabilidade do evento topo, conforme as regras mostradas na Tabela 2.5.

Alguns autores como Hauptmanns (2004), Ericson (2005), Casal (2008), Lindhe et al. (2009) e Edoytchin e Szwillus (2009) têm aplicado esta análise para conhecer as relações lógicas e diretas entre componentes e subsistemas e obter o valor da probabilidade para o evento indesejado sob a hipótese de independência das causas raízes.

Regra Algébrica	Representação teórica	Álgebra de Boole
Lei comutativa	$A \cap B = B \cap A$ $A \cup B = B \cup A$	A*B=B*A A+B=B+A
Lei associativa	$A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$ $A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$	A*(B*C)=(A*B)*C A+(B+C)=(A+B)+C
Lei Distributiva	$A \cap (BUC) = (A \cap B)U(A \cap C)$ $AU(B \cap C) = (AUB)\cap (AUC)$	A*(B+C)=(A*B)+(A*C) A+(B*C)=(A+B)*(A+C)
Lei da Idempotência	$A \cap A = A$ $A \cup A = A$	A*A=A A+A=A
Lei da absorção	$A \cap (A \cup B) = A$ $A \cup (A \cap B) = A$	A*(A+B)=A A+(A*B)=A
Complemento	$A \cap A' = \emptyset$ $A \cup A' = \Omega$	A*A'=0 A+A'=1
Teorema de Morgan	$(A \cap B)' = A' \cup B'$ $(A \cup B)' = A' \cap B'$	(A*B)'=A'+B' (A+B)'=A'*B'

Tabela 2.5 Regras da Álgebra de Boole (BAHR, 1997).

No entanto, em muitos casos, é inevitável a imprecisão da informação ou existência de relações de dependência entre os sistemas e, portanto, tem sido necessário fazer outras considerações e combinar a FTA com métodos que incluem teoria Fuzzy, Análise bayesiana, Sistemas Especialistas e Teoria de Decisão. Mon e Cheng (1994), Chen (1994), Long Sato e Horigome, (2000), Ejlali e Miremadi (2004), Shalev e Tiran (2007), Trucco *et al.* (2008) e Roed *et al.* (2009) apresetam algumas aplicações na área industrial sob o enfoque de dependência.

# 2.3.2.2. Árvore de Eventos (ETA)

A ETA (do Inglês *Event Tree Analysis*) é um método indutivo que descreve a evolução de um evento iniciador e mostra todos os possíveis resultados da ocorrência do mesmo. Esta técnica identifica e avalia as sequências acidentais com o objetivo de determinar se o evento iniciador se transformará em um acidente grave ou se o evento é suficientemente controlado pelos sistemas de segurança e procedimentos aplicados no projeto do sistema (ERICSON, 2005).

O processo inicia-se com a identificação de eventos iniciadores que perturbam o sistema e que podem causar mudanças nos estados de operação ou configuração operacional. Para cada evento iniciador são associadas as sequências de eventos de perigo que conduzirão às consequências ou eventos finais. No diagrama, na parte superior, representa-se a ocorrência do evento de perigo e, na parte inferior, representa-se a não ocorrência do mesmo (ERICSON, 2005). No passo seguinte, determina-se uma probabilidade para a ocorrência ou não de cada evento de perigo supondo independência entre os eventos, como mostra a Figura 2.8.

A árvore de eventos deve ser lida da esquerda para a direita. Na esquerda, começa-se com o evento iniciador e segue-se com os demais eventos sequenciais. A linha superior é SIM e significa que o evento realmente ocorre, enquanto que a linha inferior é NÃO e significa que o evento não ocorre (STAMATELATOS, 2002).

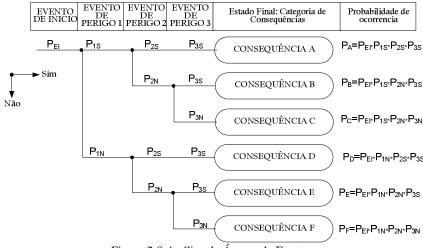


Figura 2.8 Análise de Árvore de Eventos.

A ETA é talvez a técnica mais usada nos métodos de quantificação de risco. Assim, autores como Philipson e Wilde (2000), Ongaro *et al.* (2008), Ferdous, Khan e Sadiq (2009), Catalyurek *et al.* (2010) e Vilchez, Espejo e Casal, (2011) apresentam esta técnica como uma ferramenta para estimar o risco no decorrer de uma sequência acidental de processos industriais e exploram técnicas para analisar a incerteza como a teoria Fuzzy e método de Monte Carlo, entre outros.

# 2.3.2.3. Análise Causa-Consequência

A análise causa-consequência é essencialmente um diagrama de sequência de eventos, com caminhos que levam a diferentes estados finais, em que cada caminho representa um determinado cenário de perigo. Ao longo do diagrama, são citados os eventos encontrados na fase de identificação de eventos de perigo, os quais podem ou não ocorrer (ANDREWS e RIDLEY, 2001). A árvore de eventos e a análise causa-consequência são técnicas similares. A principal vantagem da análise causa-consequência está no fato de que a estrutura do método possui uma grande facilidade para ser usado como um bom recurso de comunicação, pois os diagramas de causa-consequência são fluxogramas simples que transmitem diretamente a sequência em que ocorrem os eventos até chegar a um estado final, como mostra a Figura 2.9 (STAMATELATOS, 2002).

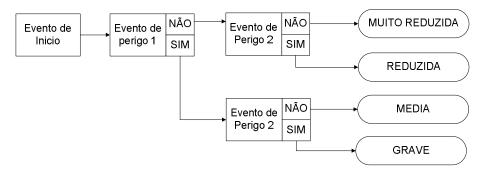


Figura 2.9 Diagrama de sequências de eventos (STAMATELATOS, 2002).

Esta análise pode ser qualitativa ou quantitativa. A abordagem qualitativa é comumente denominada de "Diagrama Sequencial de Eventos" e seu objetivo é mostrar o caminho que conduz a um acidente e analisar a sequência de um evento indesejado. No segundo caso, visando sua quantificação, autores como Andrews e Ridley (2001), Casal (2008) e Carazas e Souza (2010) entendem este método de análise de risco como uma combinação de árvores de falhas e árvore de eventos. Portanto, possui a vantagem de ser bidirecional visando a análise das consequências como método da árvore de eventos e das causas como o método da árvore

de falhas. Portanto, cada um dos eventos intermediários pode ser considerado como evento topo para a FTA e, portando, as árvores de falha são desenvolvidas visando o estudo da função dentro do sistema como um todo e não do componente individual.

Villemeur (1992), Modarres (1993), Kumamoto e Henley (1996), Andrews e Ridley (2001) e Ericson (2005) apresentam regras para a construção e quantificação do diagrama causa-consequência, bem como alguns exemplos de aplicações em sistemas industriais. Este método de quantificação tem a capacidade de relacionar dependências entre eventos de perigo.

As dependências entre os eventos podem fazer com que a ocorrência de algum deles possa eliminar a possibilidade de outros, reduzindo assim o número final de sequências. A aplicação do método proporciona uma lista de sequências dos possíveis acidentes, o número de elementos que os compõem e a natureza dos mesmos. A construção do diagrama causaconsequência é feita através da utilização de nomenclatura e simbologia própria e padronizada. Estes símbolos são apresentados na Tabela 2.6.

Símbolo Nome Descrição Funcional mponente/Sistem Função correta Representa a função do componente/sistema. O NÃO CAIXA DE representa a falha com probabilidade q<sub>i</sub>, calculada DECISÃO NÃO diretamente ou a través do FTA i SETA ÁRVORE DE i-ésimo FTA que expande as causas da falha FTA i **FALHA** representada no NÃO da caixa de decisão TRIÂNGULO Representa o evento iniciador para uma sequência, **INICIADOR** onde λ indica a taxa de ocorrência do evento TEMPO DE Representa o intervalo de tempo transcorrido entre o t=xhrs **ATRASO** final do evento A e o início do evento B В SIM Usado para simplificar o diagrama causa-consequência OU quando se tem mais de uma decisão entrando na caixa de decisão ou na caixa da consequência Componente i num CAIXA DE O componente/sistema existe num estado particular no particular estado no tempo DECISÃO tempo t SIM NÃO **CONDICIONAL** CAIXA DE Representa a saía dada uma sequência particular de CONSEQUÊNCIA eventos

Tabela 2.6 Símbolos usados na análise causa consequência (ANDREWS e RIDLEY, 2001).

## 2.3.2.4. Árvore de decisão

A árvore de decisão é um recurso gráfico usado para analisar decisões quando há risco, além de ter a capacidade de representar, de forma simples, cenários complexos, com várias alternativas e níveis de decisão (SCHUYLER, 2001). Portanto, as árvores de decisão destinam-se a modelos em que há uma sequência de decisões e cada uma delas pode levar a um resultado dentre vários resultados incertos.

Uma árvore de decisão tem uma estrutura composta por nós de decisão e nós de probabilidade (ver Figura 2.10). Os nós de decisão são representados com um quadrado e os ramos que saem destes designam as decisões ou as ações consideradas. Os nós de probabilidade são representados por círculos e as alternativas que saem destes indicam os possíveis estados do sistema com suas respectivas probabilidades. Assim, a probabilidade de ocorrência do estado em um momento determinado é calculada usando os métodos expostos no Capítulo 3. Na árvore, as consequências correspondem aos custos estimados decorrentes das falhas no sistema e dos efeitos de operação nas condições do estado.

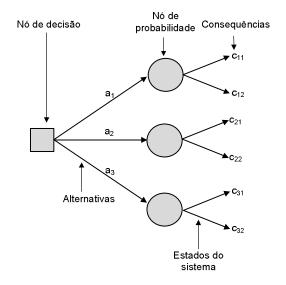


Figura 2.10 Estrutura da árvore de decisão.

Autores como Heidenberger, (1996) e Frohwein, Lambert e Haimes, (1999) mostram a aplicação deste método em sistemas onde a incerteza torna-se um fator fundamental na tomada de decisão e, portanto, mostram alternativas para estudar este tipo de sistemas. Palacios, et al. (2009) apresentam a aplicação deste método em usinas termoelétricas, usando cadeias de Markov para estimar as probabilidades associadas aos nós de probabilidade.

# 2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tanto a análise qualitativa do risco quanto a análise probabilística fazem uso de técnicas de suporte às respectivas metodologias, a fim de modelar a realidade e estruturar o conhecimento. Como foi mostrado no decorrer deste capítulo, existem inúmeras técnicas de modelagem do risco. Foi apresentada, ao longo do Capítulo 2, uma breve revisão sobre a PRA, bem como algumas técnicas de modelagem utilizadas na mesma. Estas técnicas podem ser aplicadas independentemente. No entanto, foi desenvolvida uma estrutura de trabalho, detalhada no Capítulo 4, que associa várias destas técnicas, a fim de possibilitar a avaliação dos quatro componentes identificados neste capítulo.

A seguir, na Tabela 2.7 é apresentado um resumo das técnicas que foram consideradas mais relevantes para a proposta desenvolvida e apresentada no Capítulo 4. Na Tabela 2.7, além das principais características práticas destas técnicas associadas com sua aplicação para a análise probabilístico de risco.

Na primeira coluna aparece o nome da técnica, a seguir aparece a fase do processo produtivo onde tradicionalmente é aplicada. Na terceira coluna são resumidos os resultados que podem se esperar com a aplicação da técnica analisada. Posteriormente, a técnica é classificada, segundo o caráter dos resultados obtidos, assim estes podem ser qualitativos ou quantitativos. Na quinta coluna é mencionado o grau de treinamento requerido para aplicar a técnica, bem como as habilidades ou grau de conhecimento do sistema que o analista requer, para conseguir aplicar a técnica e obter os resultados esperados. Na coluna seis, cada técnica é associada aos componentes da PRA que apoia. Finalmente aparecem e as referências bibliográficas que mostram a aplicação da técnica.

Tabela 2.7 Técnicas de análise de risco usualmente usadas na PRA.

	Fase de aplicação	Resultados	Tipo de técnica	Grau de Treinamento/ Habilidades	Componente PRA	Referências
Análise Funcional	Processo Manutenção	Avaliação de sistemas/subs, operações e procedimentos	Qualitat.	Menor/ Moderado conhecimento do sistema	Modelagem dos cenários de Risco (I)	Carazas (2006), Casal (2008), Ericson (2005), Fujiyama <i>et al.</i> (2004)
Matriz de dependência	Projeto, Processo	Avaliação de sistemas e subsistemas	Qualitat.	Menor/ Moderado conhecimento do sistema	Modelagem dos cenários de Risco (I)	Stamatelatos (2002), Chen, Ling e Chen (2003), Danilovic e Browning (2007), Tang, et al. (2010)
HAZOP	Projeto, Processo, Modificações nas fases	Identificação de perigos, desvios de parâmetros, e sugestão de mec. de controle	Qualitat.	Moderado/ Bom conhecimento específico da operação	Modelagem dos cenários de Risco (I)	Khan e Abbasi, (1997), Bahr, (1997), Ericson (2005), Casal (2008), Hu, Zhang e Wang (2009) Dunjo, et al. (2010)
РНА	Todas	Identificação de perigos, controle e consequências, Traçabilidade de perigos	Qualitat.	Menor/ Bom conhecimento do sistema	Modelagem dos cenários de Risco (I)	Correa <i>et al.</i> (2006), Aguiar (2008), Rodríguez <i>et al.</i> (2009)
FMEA	Projeto, Processo, e Manutenção	Análise de confiabilidade preliminar, Identificação de componentes críticos	Qualitat.	Menor/ Bom conhecimento do sistema	Modelagem dos cenários de Risco (I)	Scipioni et al. (2002) Cardoso (2004), Carazas (2006), Korayem e Iravani (2008), Oldenhof, et al. (2011)
FTA	Todas as fases após das necessidades serem definidas	Identificação de causas das falhas, avaliação probab., Lista <i>cut set</i> , representação gráfica do sistema	Qualitat. e Quantitat	Moderado/ Excelente conhecimento do sistema e operação	Avaliação da Probab. de Ocorrência dos Cenários de Risco (II)	Hauptmanns (2004), Ericson (2005), Casal (2008), Lindhe <i>et al.</i> (2009), e Edoytchin Szwillus (2009)
ЕТА	Processo, e Manutenção	Identificação de cenários de falha, avaliação probab. avaliação de seq. acidental	Qualitat. e Quantitat	Significativo/ Excelente conhecimento do sistema e operação	Avaliação da Probab. e conseq. de dos Cenários de Risco (II e III)	Philipson e Wilde (2000), Ongaro <i>et al.</i> (2008), Ferdous <i>et al.</i> (2009), Catalyurek, <i>et al.</i> (2010), Vilchez <i>et al.</i> (2011)
Análise Causa Cons.	Processo, e Manutenção	Identificação de cenários de falha, avaliação probab. avaliação de seq. acidental	Quantitat	Significativo/ Excelente conhecimento do sistema, do processo e operação	Avaliação da Probab. e conseq. de	Andrews e Ridley, (2001), Cardoso (2004), Carazas e Souza (2010)
Árvore de Decisão	Todas	Avaliação de alternativas	Quantitat	Significativo/ Excelente conhecimento do sistema, do processo e operação	Tomada de decisão (IV)	Heidenberger, (1996) e Frohwein, Lambert e Haimes, (1999), Palacios <i>et al</i> . (2009)

# CAPÍTULO 3 FUNDAMENTOS DE ESTIMAÇÃO E INFERÊNCIA PROBABILÍSTICA SOB INCERTEZA

# 3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

É possível afirmar que, no caso de sistemas complexos, a ocorrência de um evento indesejável está relacionada com um evento iniciador, que acontece em um componente específico, onde esta ocorrência conduz a uma sequência acidental que relaciona eventos de perigo. Desta forma, a informação que se tem sobre uma quantidade de interesse torna-se fundamental na análise e na tomada de decisão. Normalmente, o verdadeiro valor da variável de interesse é desconhecido e, portanto, é preciso estudar modelos matemáticos e estatísticos que minimizem este desconhecimento.

Além disso, o valor da incerteza a respeito da variável pode assumir diferentes graus. Do ponto de vista bayesiano, estes diferentes graus de incerteza são representados através de modelos probabilísticos. Neste contexto, é natural que diferentes pesquisadores possam ter diferentes graus de incerteza, especificando modelos distintos. Sendo assim, não existe nenhuma distinção entre quantidades observáveis e os parâmetros de um modelo estatístico, ou seja, todos são considerados quantidades aleatórias (ALBERT, 2007; GHOSH, DELAMPADY e SAMANTA, 2006).

Dessa forma, as ferramentas para estimar as probabilidades de ocorrência de falha, assim como as consequências dos acidentes, expressas por modelagem matemática, devem ter capacidade de prever os efeitos das consequências e a sensibilidade da modelagem, permitindo fazer estimações sobre a variável de interesse.

A seguir, são apresentados os fundamentos teóricos que permitem fazer esta modelagem matemática. Estes fundamentos estão divididos em três grupos: Inferência bayesiana, Análise de Markov e Modelos de Decisão Sob Incerteza.

# 3.2. PRINCÍPIOS BÁSICOS DE INFERÊNCIA BAYESIANA

#### 3.2.1. Probabilidade

A palavra probabilidade vem do latim *probare* que significa provar (CHRISTENSEN, et al., 2010). No entanto, historicamente, pode se verificar que este conceito tem várias interpretações que podem ser classificadas em duas abordagens: a primeira abordagem traz a ideia que a probabilidade é uma proporção do número de sucessos do total de certo número de ensaios; a segunda discorre sobre o grau de crença que existe de que o evento possa acontecer ou não (SINGPURWALLA, 2006).

Na primeira abordagem, a probabilidade é interpretada como uma frequência relativa e é associada à frequência com que um evento ocorre num certo experimento ou em certa população. Especificamente, se um experimento é realizado n vezes sob condições idênticas e o evento de interesse, A, ocorre em k dos n ensaios, então, a frequência relativa do evento A é a proporção k/n. Se n é incrementado, esta proporção converge a um número p, portanto, este número é definido como a probabilidade do evento A (SINGPURWALLA, 2006).

Existem várias críticas a esta abordagem, já que esta só é aplicável para situações que permitam experimentos repetíveis. Outra objeção para esta abordagem é a condição dos experimentos, já que não fica claro o conceito de condições idênticas e, em muitas ocasiões, é impossível eliminar variáveis externas ao processo, especialmente quando se trata de operações complexas. Uma terceira objeção está relacionada com n, devido ao desconhecimento sobre o tamanho ideal de n, que permite concluir que o número obtido converge para p e pode ser considerado como a probabilidade do evento A (ALBERT, 2007). Por outro lado, em muitos casos na engenharia, na medicina e na economia têm-se eventos cuja frequência é baixa e os dados empíricos para estimar os parâmetros não estão facilmente disponíveis. Estas e outras dificuldades levam a que a interpretação de probabilidade seja repensada e sejam exploradas outras abordagens (AVEN e KVALOY, 2002).

O fortalecimento da segunda abordagem nas últimas décadas resulta da análise do parágrafo anterior. A segunda abordagem é também conhecida como probabilidade subjetiva, por ser baseada em percepções ou evidências que provêm da experiência dos operadores do sistema ou de um conhecimento inicial que tem a finalidade de dar uma medida sobre quanto se espera que o evento seja verdadeiro (aconteça). Especificamente, se a informação ou evidência sobre um evento  $\boldsymbol{B}$  precede ao conhecimento de um evento  $\boldsymbol{A}$  e estes dois são independentes, então o conhecimento sobre a ocorrência da evidência  $\boldsymbol{B}$  não mudará a crença sobre  $\boldsymbol{A}$  e vice-versa. Portanto, a probabilidade a ser atribuída ao evento  $\boldsymbol{A}$  sempre será a mesma, independente da

informação sobre o evento B. Entretanto, se A e B são dependentes, o conhecimento que se tenha sobre B mudará a crença sobre A (ALBERT, 2007).

Esta abordagem envolve o uso de informação subjetiva proveniente de um conhecimento prévio, chamada de probabilidade *a priori* ou incondicional, e uma probabilidade condicional (probabilidade *a posteriori*) que depende do estado de conhecimento. O fato de a probabilidade final depender deste estado de conhecimento e da precisão das estimativas é uma das potencialidades da análise bayesiana, porém constitui a complexidade da abordagem.

Dentre as grandes vantagens desta abordagem, está a possibilidade de considerar tipos de informação que na abordagem frequentista não é possível utilizar, sem excluir a informação relativa à frequência, já que esta informação está inclusa no estado de conhecimento. A análise bayesiana está baseada na premissa de que todas as incertezas inerentes ao processo analisado seguem uma distribuição de probabilidade e devem ser modeladas (GHOSH, DELAMPADY e SAMANTA, 2006).

Independente da abordagem, em ambos os casos obedecem-se aos axiomas de probabilidade e as leis de probabilidade continuam sendo válidas. No caso específico da interpretação bayesiana, considera-se que o parâmetro desconhecido e os dados antes da observação têm uma distribuição de probabilidade que provém de um modelo de processo semelhante, bem como do julgamento subjetivo. Deste modo, a distribuição do parâmetro surge como uma quantificação do conhecimento ou da crença.

#### 3.2.2. Generalização do Teorema de Bayes

Como foi discutido na seção anterior, a probabilidade de um evento A pode ser interpretada como uma medida da crença que o analista tem sobre sua ocorrência. Assim, a probabilidade condicional P(A|B), que corresponde ao grau de crença que se tem sobre que realmente A aconteça, quando é conhecida uma nova informação ou evidência B, está definida matematicamente como mostra a eq. (3.1).

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \tag{3.1}$$

Note-se que, tanto a P(A) quanto a P(A|B) estão condicionadas ao estado do conhecimento do analista. Como já foi mencionado anteriormente, estas probabilidades seguem as leis de probabilidade e particularmente devem obedecer ao Teorema de Bayes que permite calcular P(A|B) a partir de P(B|A) e a P(A) como indica a eq. (3.2).

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} \Rightarrow P(A \cap B) = P(B|A) \cdot P(A) \xrightarrow{3.1}$$

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)}$$
(3.2)

Na eq. (3.2) pode ser observado que a probabilidade de que A aconteça dada a nova evidência B deve ser proporcional ao produto de duas medidas: (1) a crença que o analista tem sobre A, antes de ter informação sobre a nova evidência e, (2) a probabilidade de que a evidência B é observada quando A realmente ocorre. Além disso, a probabilidade da evidência deve obedecer a uma constante de proporcionalidade ou normalizador (LINDLEY, 1965).

Neste mesmo sentido, seja A um conjunto de eventos mutuamente excludentes,  $\{A_I, A_2, A_3, ..., A_n\}$  tal que a probabilidade de cada um destes eventos é diferente de zero. Seja B um evento do qual se conhecem as probabilidades condicionais  $P(B|A_i)$ , então  $(A_i|B)$  pode ser expressa pela eq. (3.3) (GHOSH, DELAMPADY e SAMANTA, 2006).

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i) \cdot P(A_i)}{\sum_{j=1}^{n} P(B|A_j) \cdot P(A_j)}$$
(3.3)

No caso de se ter um parâmetro  $\theta$  onde o valor do parâmetro está entre  $\theta e \theta + d\theta$ , então o teorema de Bayes toma a forma expressa na eq. (3.4).

$$\{\theta \leq Valor \ do \ parâmetro \leq \theta + d\theta\}$$

$$P(\theta|E) = \frac{L(E|\theta) \cdot P_0(\theta)}{\int L(E|\theta) \cdot P_0(\theta) \cdot d\theta} \Rightarrow$$

$$P(\theta|E) \propto L(E|\theta) \cdot P_0(\theta)$$
(3.4)

Nesta equação,  $P_{\theta}$  é análogo à P(A) na eq. (3.2) e corresponde à função densidade de probabilidade a priori para o parâmetro desconhecido  $\theta$ ,  $L(E|\theta)$  é equivalente à P(B|A) na eq. (3.2) e é chamada de função de verossimilhança. Esta corresponde à probabilidade condicional de observar a evidência E dado  $\theta$ .  $P(\theta E)$  corresponde à função densidade de probabilidade para o parâmetro  $\theta$  após obter a evidência E, que é chamada de função a posteriori. A integral no denominador corresponde ao valor esperado com respeito à distribuição a priori. Esta relação assegura que a função a posteriori é integrada sobre todos os valores de  $\theta$ , ou seja, em outras palavras, esta função é uma função densidade de probabilidade adequada. Logo, a crença sobre o parâmetro, dado que exista a evidência E, depende da função verossimilhança e da probabilidade a priori (BERNARDO e SMITH, 2001).

A evidência pode estar em forma de dados históricos, opinião de especialistas ou modelos de predição e, portanto, o teorema de Bayes possibilita uma estimação de probabilidades decorrentes de um novo estado de informação. Assim, a inferência bayesiana é iniciada usando probabilidades *a priori* para descrever o estado de conhecimento. Posteriormente, ela incorpora informação através de coleta de dados, resultando, assim, em uma nova probabilidade, *a posteriori*, que descreve o estado de conhecimento após combinar a probabilidade *a priori* com os dados levantados.

# 3.2.3. Estimação de Parâmetros bayesianos

A estimação bayesiana deve envolver tanto o grau de crença quanto a informação dos dados coletados sobre o comportamento do sistema. A estimação dos parâmetros compreende quatro passos. Primeiramente, é necessário definir o modelo probabilístico que vai permitir que sejam definidos os parâmetros a serem estimados. Após este primeiro passo, deve-se definir a função *a priori* que quantifica apropriadamente o estado do conhecimento do analista (segundo passo). O terceiro passo envolve a definição da forma apropriada da função de verossimilhança e a construção da mesma a partir da coleta de dados. E, finalmente, obtém-se a função *a posteriori* usando o teorema de Bayes, obtendo-se, assim, a transformação da distribuição *a priori* dada a nova informação (ALBERT, 2007). A Figura 3.1 mostra que a das distribuições *a priori* e a função de verossimilhança influenciam diretamente no comportamento da distribuição *a posteriori*.

Um primeiro caso mostra que, quando a informação *a priori* é forte, porém a nova informação corresponde a uma informação não relevante, então a distribuição *a posteriori* não será influenciada pela nova informação e será praticamente idêntica à distribuição *a priori*. Neste caso, a estimação dos parâmetros será idêntica ao método tradicional (Figura 3.1a). Um segundo caso surge quando tanto a informação do analista como a nova informação são de ponderação comparável, então a distribuição *a posteriori* pode apresentar forma e escala diferentes das duas funções geradoras (Figura 3.1b). No terceiro caso, a distribuição *a priori* apresenta um comportamento quase constante na região onde a função de verossimilhança é máxima e, neste caso, a distribuição *a posteriori* dependerá da nova informação, (Figura 3.1c) (MARITZ e LWIN, 1989).

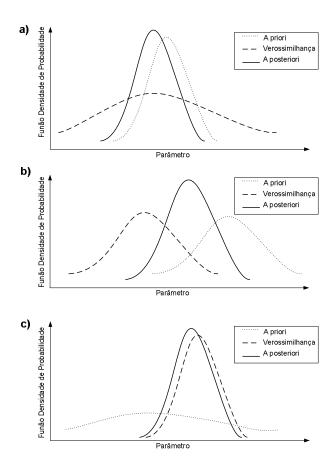


Figura 3.1 Relação entre a distribuição A priori, verossimilhança e A posteriori.

#### 3.2.3.1. *Modelo Probabilístico de Falha*

A análise de risco pode ser entendida como uma medida da incerteza associada com a ocorrência de eventos indesejados, tais como falhas nos componentes do sistema. Portanto, o modelo probabilístico definido será função do tipo de análise de falha a ser realizado. Deste modo, é importante definir os conceitos associados à análise probabilística das falhas e ver sua interpretação na inferência bayesiana (SINGPURWALLA, 2006).

A confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de que um componente, equipamento, ou sistema execute as operações para as quais foi projetado por um tempo determinado, sem apresentar falha (LEWIS, 1987).

As abordagens mais tradicionais para a seleção de modelos para descrever a distribuição temporal das falhas são baseadas no conhecimento do comportamento do item ou na análise física da falha. Assim, a confiabilidade para qualquer sistema, processo ou operação é definida usando o tempo até a falha (RAUSAND e HOYLAND, 2004). Em um primeiro estágio, é preciso definir a função que os subsistemas e componentes tem no processo, indicando o

desempenho esperado e os diferentes modos de falha que poderiam apresentar, assim como também é importante definir as características da distribuição dos tempos até a falha. Após a obtenção dos tempos de falha, a função de confiabilidade será gerada a partir da função de distribuição acumulada. Esta pode ser interpretada como a proporção de itens que falharam até tempo  $t_i$  e expressa a probabilidade de ocorrer falha até um tempo t (LEITCH, 1995).

Considere-se que T denota o tempo até ocorrer a falha de um item cuja missão tem uma duração [0, t]. Portanto, T é uma variável aleatória e sua correspondente função densidade de probabilidade  $f_T(t)$ , para um intervalo de tempo específico, está representada na eq. (3.5) (LEWIS, 1987).

$$f_T(t) \cdot \Delta t = P\{t \le T < t + \Delta t\} \tag{3.5}$$

Assim, a função distribuição acumulada é sempre crescente, já que representa a área sob a curva representativa da função de densidade de probabilidade para os tempos de falha. A eq. (3.6) define a função distribuição acumulada  $F_T(t)$  para  $f_T(t)$ , que representa a probabilidade de que o tempo T em que ocorra uma falha seja menor ou igual ao tempo de estudo t (LEWIS, 1987).

$$F_T(t) = P\{T \le t\} \Rightarrow F(t) = \int_0^t f_T(u) du$$
 (3.6)

Segundo a definição de confiabilidade dada anteriormente, pode-se afirmar que a confiabilidade é a função distribuição acumulada complementar (eq. (3.6)) e, portanto, pode ser expressa pela eq. (3.7) e será uma função decrescente no tempo.

$$R(t) = P\{T > t\} \Rightarrow R(t) = 1 - \int_0^t f_T(u) du$$
 (3.7)

A definição anterior concorda com o ponto de vista físico de operação, pois espera-se que quanto maior seja o tempo de operação, menor será a probabilidade de que o sistema possa executar suas funções com o desempenho esperado, dado o envelhecimento natural que este vai sofrendo (SOUZA, 2003).

Unido ao conceito de confiabilidade está o conceito da taxa de falha instantânea,  $\lambda(t)$ , que é definida como: "A probabilidade de que o sistema falhará no próximo intervalo de tempo dado que ainda não falhou até o presente instante de tempo de operação". A taxa de falha é expressa pela relação indicada na eq. (3.8) (MODARRES, 1993).

$$\lambda(t) \cdot \Delta t = P\{T \le t + \Delta t | T > t\} \tag{3.8}$$

Da expressão constante da eq. (3.8) e usando o teorema de Bayes, pode-se encontrar a relação entre a taxa de falha e a confiabilidade como é mostrado na eq. (3.9) (MODARRES, 1993).

$$P\{T \le t + \Delta t | T > t\} = \frac{P\{(T \ge t) \cap (T < t + \Delta t)\}}{P\{T > t\}}$$

$$P\{t \le T < t + \Delta t\} \equiv P\{(T \ge t) \cap (T < t + \Delta t)\}$$

$$P\{t \le T < t + \Delta t\} \equiv f(t) \cdot \Delta t$$

$$\therefore \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$
(3.9)

Da eq. (3.9), conclui-se que a taxa de falha depende do intervalo que está sendo observado ou do estado ou tempo de operação do item analisado.

Deste modo, a confiabilidade R(t) para algum parâmetro  $\theta$  pode ser definida matematicamente como mostra a eq. (3.10).

$$R(t) = P(T \ge t) = \int_{\theta} P(T \ge t | \theta) \cdot F(d\theta)$$
 (3.10)

Nela,  $F(\theta)$  é a função distribuição do parâmetro  $\theta$ , a melhor avaliação sobre a incerteza do parâmetro que corresponde à distribuição *a priori* para  $\theta$ .

Na maioria das análises, o interesse está centrado em  $\mathbf{n}$  itens, cada um com tempo de vida  $\mathbf{T}_{\mathbf{i}}$ , então, neste caso, a confiabilidade pode ser definida como mostra a eq. (3.11) (SINGPURWALLA, 2006).

$$P(T_1 \ge t_1, \dots, T_n \ge t_n) = \int_{\theta} \prod_{i=1}^n P(T_i \ge t_i | \theta) \cdot F(d\theta)$$
(3.11)

#### 3.2.3.2. Distribuição A priori

A análise bayesiana exige a atribuição de uma distribuição *a priori*. Esta distribuição deve representar, probabilisticamente, o conhecimento que se tem sobre  $\boldsymbol{\theta}$  antes de se obter a nova informação e refletir a incerteza sobre os possíveis valores dos parâmetros antes que os dados sejam coletados. Portanto, a distribuição *a priori* para o parâmetro  $\boldsymbol{\theta}$  terá uma densidade de probabilidade  $P_0(\boldsymbol{\theta})$ . Assim, a função *a priori* é escolhida de tal forma que expresse o conhecimento do analista e a incerteza associada ao parâmetro desconhecido (GHOSH, DELAMPADY e SAMANTA, 2006).

O desenvolvimento da distribuição *a priori* é o principal desafio, já que requer converter a crença sobre o processo em uma medida quantitativa (SIU e KELLY, 1998).

A primeira dificuldade que se tem é em relação aos dados disponíveis do processo, já que da precisão e da forma de como os dados foram coletados dependerá a influência que terá a distribuição *a priori* na estimação da distribuição *a posteriori*, porém esta informação nem sempre está disponível.

Em alguns casos, a informação sobre a crença do analista está bem definida e existem estudos prévios que permitem definir claramente o comportamento do sistema. Porém, em outros, a função *a priori* deve ser desenvolvida, sendo então necessário definir previamente se a crença do analista pode ser considerada precisa ou, pelo contrário, trata-se de uma crença vaga. Caso a crença do analista possa ser considerada precisa ou a distribuição *a priori* esteja claramente definida, diz-se que a distribuição *a priori* é informativa; no outro caso, trata-se de uma distribuição *a priori* não-informativa (CHRISTENSEN, et al., 2010).

#### Distribuição A priori Informativa

Caso exista informação precisa do analista, porém a distribuição exata não seja conhecida, destacam-se três métodos para desenvolver esta distribuição: 1) Bayes empírico, 2) Máxima entropia e 3) Hierárquico (SIU e KELLY 1998).

O método de Bayes empírico é usado para criar a distribuição *a priori* quando há dados disponíveis e, assim, ajustar distribuições a um conjunto de dados disponíveis. No entanto, este método não será explicado neste texto por tratar-se de uma abordagem que envolve o uso de técnicas clássicas, como o método dos momentos e o método de máxima verossimilhança, que não serão usadas nesta pesquisa. Para mais detalhes, o leitor pode consultar Maritz e Lwin (1989), que apresentam uma discussão detalhada e específica sobre este método de Bayes empírico, usando diversos tipos de dados, bem como textos clássicos de inferência estatística. Já os métodos 2 e 3 serão explicados com mais detalhe.

O método da Máxima Entropia é usado quando, embora não haja dados disponíveis, existem outras formas de informação. O método foi desenvolvido por Shannon, na década de 40, como uma medida da quantidade de informação em uma mensagem, chamada de entropia (SIU e KELLY, 1998).

A entropia representa a medida de quantidade de informação que se espera obter ao conhecer a variável aleatória ou, equivalentemente, a redução das fontes de incerteza esperada. A função entropia *I(0)*, está definida na eq. 3.12. A distribuição *a priori* será aquela que maximiza a função da entropia (ROMERO, 2008):

$$I(\theta) = -\int_{-\infty}^{\infty} P(\theta) \cdot ln[P(\theta)] d\theta$$
 3.12

A Tabela 3.1 apresenta algumas soluções que maximizam a entropia sob restrições especificas do parâmetro **θ**.

Restrições	Distribuição A priori
$a \le \theta \le b$	$\frac{1}{b-a}$
$\theta \geq 0; E[\theta] = \mu \ conhecido$	$\frac{1}{\mu}e^{-\theta/\mu}$
$a \leq \theta \leq b$ ; $E[\theta] = \mu \ conhecido$	$rac{eta e^{eta  heta}}{e^{eta  ext{b}} - e^{eta a}}$
$-\infty \le \theta \le \infty$ ; $E[\theta] = \mu$ ; $Var[\theta] = \sigma^2$ conhecidos	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}e^{\left\{-[\theta-\mu]^2/2\sigma^2\right\}}$

Tabela 3.1 Distribuições A priori geradas com o método de máxima entropia (SIU e KELLY, 1998).

A definição de entropia apresenta três inconvenientes: 1) os valores de  $I(\theta)$  podem ser tanto negativos quanto positivos, 2)  $I(\theta)$  pode ser infinito e 3)  $I(\theta)$  depende unicamente da densidade de probabilidade, fazendo com que  $I(\theta)$  seja variável quando existirem mudanças de escala.

Autores como Atwook (1996), Romero (2008) e Hideki (2008) utilizam este método. No entanto, Siu e Kelly (1998) destacam três objeções filosóficas.

O método Hierárquico consiste em dividir a estimação da distribuição *a priori* em estágios. Este método reduz a variabilidade das incertezas que são ignoradas quando os dados provêm de várias fontes. O primeiro estágio é criar uma distribuição *a priori* para um parâmetro φ baseado numa população. No estágio seguinte, é calculada a distribuição *a posteriori* aplicando o teorema de Bayes. Esta distribuição corresponderá à distribuição *a priori* atualizada para a amostra específica e será do tipo multivariado (EHLERS, 2003).

A seguir, é apresentado um exemplo para ilustrar o método. Suponha-se que **\phi** tenha uma distribuição discreta cuja distribuição *a priori* é apresentada na eq. (3.13).

$$P_0(\theta) = \sum_{i=1}^{k} P(\theta|\phi) P_0(\phi_i)$$
 (3.13)

Aplicando-se o teorema de Bayes, a distribuição a posteriori de  $\theta$  dado  $\phi$  estaria representada como mostra a eq. (3.14).

$$P_0(\theta|E) = \sum_{i=1}^k \frac{P(E|\theta)P(\theta|\phi_i)}{\int P(E|\theta)P(\theta|\phi_i)} P(\phi_i|E)$$
(3.14)

Teoricamente, não há limitação em relação ao número de estágios, entretanto, devido às complexidades matemáticas resultantes, as distribuições *a priori* hierárquicas são especificadas em geral em dois ou três estágios. Além disso, devido à dificuldade de interpretação dos hiperparâmetros em estágios mais altos, é uma prática comum especificar distribuições *a priori* não-informativas para estes níveis (SIU e KELLY, 1998).

## Distribuição A priori Não-Informativa

No caso em que distribuição *a priori* apresente um comportamento quase constante na região onde a função de verossimilhança é máxima, a distribuição *a posteriori* dependerá unicamente da nova informação e, desta forma, a distribuição *a priori* a ser usada será uma distribuição do tipo não-informativa. Estas distribuições surgem quando existe um grande número de dados e, portanto, a informação contida na amostra é grande quando comparada com a informação que gera a distribuição *a priori*.

As distribuições não-informativas começaram a ser usadas no século XVII com trabalhos desenvolvidos por Bayes e Laplace. Bayes usou uma distribuição uniforme para  $\theta$  vinda de uma distribuição binomial e Laplace usou uma uniforme imprópria para a média de uma distribuição normal (SINGPURWALLA, 2006). A seguir, são apresentados alguns dos métodos para obtenção de distribuições *a priori* não-informativas.

O primeiro método recomenda representar a distribuição a priori por uma distribuição uniforme. Este representação indica que o analista não tem motivo para acreditar que um valor particular do parâmetro seja mais provável que outro. Em outras palavras, todos os valores dos parâmetros desconhecidos têm a mesma chance de acontecer. Um problema ao se trabalhar com esta distribuição a priori é que, no caso em que o intervalo de variação de  $\theta$  seja ilimitado, a distribuição a priori será imprópria (BERNARDO e SMITH, 2001).

Outro método bastante conhecido para estimar este tipo de distribuições foi proposto por Jeffreys em 1946 (SINGPURWALLA, 2006). A distribuição *a priori* não-informativa de Jeffreys considera uma regra geral para obter as distribuições *a priori*, considerando uma única observação X com função densidade de probabilidade  $P(X|\theta)$ , como mostra a eq. 3.15:

$$P_0(\theta) = \left(E_{X|\theta} \left[\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} ln[P(X|\theta)]\right]\right)^{1/2}$$
 3.15

A grande vantagem desta distribuição *a priori* é ser invariável às transformações, não obstante a existência da distribuição *a priori* de Jeffreys requerer condições assintóticas fortes, ou seja, que

a frequência relativa do evento vá se estabilizando e variando cada vez menos na medida em que seja incrementado o número de ensaios.

## 3.2.3.3. Função de verossimilhança

A função de verossimilhança corresponde à probabilidade de se obter a amostra observada como função do verdadeiro estado de natureza do parâmetro. Portanto, a construção de uma função de verossimilhança apropriada requer um conhecimento específico para o processo que está sendo modelado (GHOSH, DELAMPADY e SAMANTA, 2006).

Em um problema de estimação padrão, o analista é provido com um grupo de dados observados que devem ser usados para estimar os parâmetros correspondentes ao processo que os gera. Embora não exista um conjunto de regras para modelar o processo gerador dos dados, Siu e Kelly (1998) mencionam alguns passos importantes a serem levados em consideração. O primeiro passo é determinar se a variável aleatória é discreta ou contínua. Em uma análise de falha é comum usar como variável discreta o número de componentes que falham ou número de falhas de um componente e, como variável contínua, o tempo de falha dos componentes. A partir desta decisão, o analista pode estabelecer algumas distribuições mais apropriadas para modelar seu processo de geração de dados, como demonstrado na Figura 3.2.

Após ter selecionado a distribuição mais apropriada para o processo gerador dos dados, o procedimento segue para encontrar os parâmetros que consigam explicar o comportamento destes dados gerados e, então, ficará definida a função de verossimilhança  $L(\theta)$ , que é proporcional à probabilidade de observar a evidência E (BERNARDO e SMITH, 2001). No caso de múltiplos conjuntos condicionalmente independentes de evidências, a função de verossimilhança é dada pela eq. (3.16).

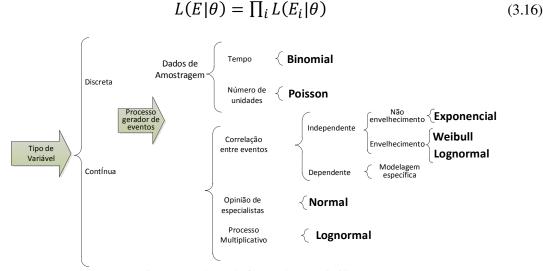


Figura 3.2 Seleção da função de verossimilhança.

A função de verossimilhança para o *i-ésimo* conjunto de evidências é desenvolvida usando uma apropriada função de distribuição de probabilidade (BERNARDO e SMITH, 2001).

# 3.2.3.4. Distribuição A posteriori

Dada a função de verossimilhança  $L(E|\theta)$  e a função *a priori*  $P_{\theta}(\theta)$ , a probabilidade *a posteriori* pode ser calculada como mostra a eq. (3.4).

É fato que, para obter-se a distribuição *a posteriori*, é necessário o desenvolvimento de integrais no domínio de  $\theta$ e que a avaliação destas representará uma dificuldade ao ser implantada uma solução bayesiana. Assim, nos casos em que a função de verossimilhança envolve um parâmetro, a implantação requer a avaliação de integrais unidimensionais. Não obstante, em problemas onde a função de verossimilhança é multiparamétrica, a tarefa de implantação torna-se mais complexa quando aumenta o número de componentes de  $\theta$  (GHOSH, DELAMPADY e SAMANTA, 2006). Por outro lado, uma vez que  $P_{\theta}(\theta)$  está agindo como uma representação de crenças, é exigido que a classe de funções matemáticas a partir da qual  $P_{\theta}(\theta)$  é escolhida seja ampla e, portanto, possa representar com facilidade a adequação de outras crenças. No entanto, estes dois fatos podem complicar ainda mais a avaliação da distribuição *a posteriori* (LINDLEY, 1965).

Em compensação, quando existem crenças específicas, existem opções que permitem usar formas particulares da função *a priori* que são compatíveis com a função de verossimilhança e, consequentemente, a avaliação das integrais pode ser realizada diretamente, facilitando, assim, os cálculos. Este tipo de análise é chamado de análise conjugada (BERNARDO e SMITH, 2001).

Na análise conjugada, a distribuição *a posteriori* tem a mesma forma da distribuição *a priori* e, comumente, os parâmetros da distribuição *a posteriori* estão relacionados com os parâmetros da distribuição *a priori*, com uma modificação de escala por causa da função de verossimilhança. O procedimento para determinar a distribuição conjugada, mostrado por Bernardo e Smith (2001), é ilustrado no texto a seguir:

Considere-se que a evidência E está formada por um conjunto de variáveis aleatórias  $x_1, x_2,..., x_n$ , (discretas ou contínuas) que representam as observações ou dados experimentais.

Suponha que E é uma amostra distribuída exponencialmente segundo a forma que mostra a eq. (3.17) (BERNARDO e SMITH, 2001):

$$P(E|\theta) = \prod_{j=1}^{n} f(x_j) [g(\theta)]^n e^{\left\{ \sum_{i=1}^{k} c_i \phi_{i(\theta)} (\sum_{k=1}^{n} h_k(x_k)) \right\}}$$
(3.17)

onde f, h,  $\phi$ , c são fatores do espaço amostral.

A família conjugada para  $\theta$  está definida na eq. (3.18):

$$P(\theta|\tau) = [K(\tau)]^{-1} [g(\theta)]^{\tau_0} e^{\sum_{i=1}^k c_i \phi_{i(\theta)\tau_i}}$$
(3.18)

onde  $\tau = (\tau_0, \tau_1, \ldots, \tau_n)$  é tal que  $K(\tau) = [g(\theta)]^{\tau_0} e^{\sum_{i=1}^k c_i \phi_{i(\theta)\tau_i}}$ .

A partir deste resultado, verifica-se que a conjugada, no caso de análise homogênea, para uma distribuição Bernoulli é uma distribuição Beta.

Suponhamos que *E* seja uma amostra que provém de um ensaio do tipo Bernoulli e a função *a priori* foi definida como uma distribuição Beta. Assim, a função de verossimilhança pode ser escrita da forma apresentada na eq. (3.19), (BERNARDO e SMITH, 2001):

$$P(x_i, ..., x_n | \theta) = (1 - \theta)^n e^{\left\{ln\left(\frac{\theta}{1 - \theta}\right)\sum_{i=1}^n x_i\right\}}$$
(3.19)

Usando a eq. (3.18), a distribuição *a priori* pode ser definida como mostra a eq. (3.20):

$$P(\theta|\tau) \propto (1-\theta)^{\tau_0} e^{\left\{ln\left(\frac{\theta}{1-\theta}\right)\tau_1\right\}}$$

$$P(\theta|\tau) = \frac{1}{K(\tau_0,\tau_1)} \theta^{\tau_1} (1-\theta)^{\tau_0-\tau_1}$$
(3.20)

Assumindo que **K** existe e está representada pela eq. (3.21):

$$K(\tau_0, \tau_1) = \int_0^1 \theta^{\tau_1} (1 - \theta)^{\tau_0 - \tau_1} d\theta$$
 (3.21)

Usando as equações 3.19 a 3.21 pode-se dizer que a distribuição a *priori* Beta( $\alpha,\beta$ ) é conjugada com a função de verossimilhança da distribuição de Bernoulli, já que distribuição a *posteriori* resultante é uma Beta( $\alpha'=\tau_1+1,\beta'=\tau_0-\tau_1+1$ ).

## 3.3. ANÁLISE DE MARKOV

A análise de Markov é uma forma de modelar processos onde as transições entre estados são probabilísticas. Em geral, existe a chance de que, no decorrer da operação, os sistemas passem de um estado de operação aceitável para um estado de operação inaceitável.

Certamente, os modelos determinísticos contribuem com a compreensão do comportamento de sistemas, mas por não considerar as mudanças de estado são ineficientes nos processos de tomada de decisão. Desta maneira, recorre-se ao emprego de processos estocásticos como uma forma de tratar quantitativamente estes fenômenos, aproveitando certas características de

regularidade que estes apresentem por serem descritos por modelos probabilísticos (LEITCH, 1995).

Pode-se definir um processo estocástico como um conjunto de variáveis aleatórias indexadas a uma variável (geralmente o tempo), sendo representado por  $\{X(t), t \in T\}$ , onde os valores que X(t) podem assumir são chamados de estados e seu conjunto X é chamado de espaço de estados. Uma grande vantagem destes métodos é não requerer a hipótese de independência e poderem ser usados para analisar falhas sequenciais com precisão (ANDREWS e RIDLEY, 2001).

A análise de Markov é um método usado para modelar sistemas com transições entre estados e calcular a probabilidade de atingir os estados do sistema. Esta técnica é uma ferramenta para modelar sistemas complexos envolvendo duração, sequenciamento, reparo, redundância e falha.

Nas aplicações práticas, analisar o comportamento de um sistema por uma abordagem markoviana resume-se em encontrar a descrição adequada para os possíveis estados do sistema, aos quais se associam processos aleatórios onde o conhecimento do estado atual permite prever o comportamento futuro do processo, através de suas transições possíveis.

#### 3.3.1. Conceitos Básicos da Análise de Markov

Um Processo de Markov é uma classe de processo estocástico no qual pode ser definido um modelo probabilístico que satisfaz a propriedade de Markov ou "perda de memória", ou seja, seu comportamento futuro somente é condicionado pelo estado presente, independentemente de sua história ou dos estados em que esteve no passado (HILLIER e LIEBERMAN, 1995). De fato, para um processo de Markov é completamente irrelevante qualquer informação sobre os estados passados, ou sobre o tempo de permanência no estado presente. Portanto, em um processo de Markov, as transições entre estados são causadas pela ocorrência de acontecimentos ou eventos. Assim, as probabilidades de transição entre estados apenas dependem do estado ocupado no tempo t e, consequentemente, são constantes (MOURA e DROGUETT, 2008). No processo de Markov, o sistema é graficamente representado por uma cadeia constituída por arcos e nós, como mostra a Figura 3.3, onde um estado é representado por um círculo ou nó com a respectiva denominação e as transições entre estados são representadas por arcos, aos quais estão associados as respectivas probabilidades de transição  $p_{kj}$ ,  $p_{jk}$ 

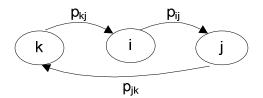


Figura 3.3 Diagrama de Processo de Markov contínuo.

Matematicamente, um processo de Markov pode ser representado como mostra a eq. (3.22) (LIMNIOS, 1997).

$$P\{X(t)=j|X(t-1)=i,X(t-2)=k_{t-2},\dots,X(1)=k_1,X(0)=k_0\}=P\{X(t)=j|X(t-1)=i\} \qquad (3.22)$$
 onde,  $\forall \ t=0,1,2,\dots$  e  $\forall \ i,j,k_t \in X$ 

Um Processo de Markov em tempo discreto é um processo estocástico em que uma variável t representa intervalos de tempo,  $\{X(t), t = 0,1,2,3...\}$ , onde cada variável aleatória X(t) assume valores dentro de um espaço de estados S e a probabilidade de X(t) estar no estado J no próximo intervalo depende apenas do estado presente e não dos estados visitados no passado. Este processo é chamado de Cadeia de Markov quando as variáveis aleatórias X(t) estão definidas em um espaço de estados discretos S. Um caso particular de Cadeias de Markov é a Cadeia de Markov Homogênea no tempo, onde as probabilidades de transição não mudam ao longo do tempo, ou seja, são independentes do tempo de observação. As variáveis aleatórias que regem as transições entre estados neste tipo de cadeia são distribuídas segundo uma distribuição exponencial e, como consequência, as probabilidades de transição não dependem do tempo já percorrido pelo sistema, e sim do tempo atual para a transição. Já em um processo Não-Homogêneo, as taxas de transição são representadas como funções densidade de probabilidade (PERMAN, SENEGACNIK e TUMA, 1997).

Em uma Cadeia de Markov Discreta, a evolução do processo é definida a partir de uma matriz de transição de probabilidades  $P=[p_{ij}]$  definida na eq. (3.23). A probabilidade de ir de um estado i ao estado j [ $p_{ij}$ ] é calculada a partir das equações de Chapman-Kolmogoroff. Estas equações são definidas a partir das probabilidades de ir do estado i para algum estado  $r \in S$  em n passos e, em seguida, de ir do estado r para o estado j em m passos. Cabe ressaltar que a probabilidade de sair de um estado e chegar a outro estado em n + m passos não depende do caminho ou sequência de estados percorridos (LOPES-MACHADO, 2004).

$$p_{ij}(t) = P\{X(t) = j | X(t - u) = i\}$$

$$P = \begin{bmatrix} p_{00} & \cdots & p_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n0} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

$$\therefore \sum_{j \in S} p_{ij}(t) = 1 \; ; \; p_{ij}^{(n+m)} = \sum_{r \in S} p_{ir}^{(n)} p_{ir}^{(m)}$$
(3.23)

onde,  $t, u \in \Re \ \forall \ i, j, r \in S$ 

Uma Cadeia de Markov Discreta se caracteriza quando o processo é observado em intervalos equidistantes de tempo e fica completamente definida quando os estados  $\{X(t)=0,1,2,3...s\}$  e as probabilidades de transição entre os estados em um período são conhecidas (HILLIER e LIEBERMAN, 1995).

Em uma Cadeia de Markov Contínua, a variável aleatória representa instantes de tempo e não intervalos, como no caso anterior. Tal como no caso discreto, uma Cadeia de Markov Contínua pode ser representada através de um diagrama de transição de estados como mostra a Figura 3.3.

Assim, em uma Cadeia de Markov Contínua, a evolução do processo também é definida através de uma matriz de transição de probabilidades  $P(t)=[p_{ij}]$ . A definição de P de forma genérica está dada pela eq. (3.23), mas como esta definição não facilita a obtenção de expressões analíticas, recorre-se à definição de uma matriz Q que se relaciona com P, como mostra a eq. (3.24). Os elementos da matriz Q podem ser interpretados como as taxas de transição entre estados, assim,  $q_{ij}$  corresponde à taxa de transição entre os estados i e j e  $q_{ij}$  é a soma de todas as taxas das transições que saem do estado i. (LOPES-MACHADO, 2004):

$$q_{ij} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P\{X(t + \Delta t) = j | X(t) = i\}}{\Delta t}$$

$$q_{ij} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{p_{ij(\Delta t)}}{\Delta t}, i \neq j \ q_{ii} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{p_{ii(\Delta t)}}{\Delta t}$$
(3.24)

onde  $q_{ij} \ge 0 \ \forall \ i,j \in S, i \ne j$ 

A equação para as probabilidades de estado é apresentada na eq. (3.25), cuja dedução é realizada por meio da equação de Chapman–Kolmogorov (BARROS, 2006):

$$\frac{d}{dt}P_{j}(t) = \frac{d}{dt}P\{X(t) = j\} = \sum_{i} q_{ij}(t) \cdot P\{X(t) = i\}$$
 (3.25)

As probabilidades de transição entre os estados dependem do tempo de permanência em esse estado, porém, considerando a propriedade de Markov, este tempo deve ser definido por uma distribuição exponencial. Em muitos casos, o tempo de permanência em um estado segue uma distribuição não—exponencial e, nestes casos, é preciso seguir uma abordagem de processo Semi-Markov (BECKER, CAMARINOPOULOS e ZIOUTAS, 2000).

#### 3.3.2. Processo Semi-Markov

Um processo Semi-Markov pode ser considerado uma generalização de um processo de Markov, sendo que para este a informação sobre o tempo de permanência no estado atual deixa de ser irrelevante. Portanto, pode-se definir como um processo de tempo contínuo, onde a evolução futura não depende apenas do estado atualmente ocupado, mas também do tempo de entrada no estado atual. A duração em cada estado é descrita por uma variável aleatória que depende do estado atual e do estado para o qual acontecerá a próxima transição. A consequência é que os tempos entre acontecimentos sucessivos deixam de estar limitados à distribuição exponencial, podendo ser modelados por qualquer distribuição de probabilidade (WINSTON, 1994). Desta forma, o tempo das visitas nos estados que são governadas por uma cadeia de Markov possui uma função de densidade de probabilidade que depende dos estados entre os quais a transição é realizada.

Por outro lado, este processo pode ser visto como uma generalização de uma cadeia de Markov Contínua, em que é permitido que o tempo de permanência em um estado possua uma função densidade de probabilidade não-exponencial e na qual existem transições para o próprio estado.

## 3.3.2.1. Taxas de Transição de Estado

Para um processo Semi-Markov, a propriedade de Markov só é requerida para os pontos de transição. Este processo pode ser descrito por probabilidades de transição, como mostra a eq. (3.26), (PERMAN, SENEGACNIK e TUMA, 1997):

$$q_{ij}(t) = P\{Z(T_n) = j \cap T_n - T_{n-1} \le t | Z(T_{n-1}) = i\} = \sum_k q_{ik}(t)$$
 (3.26)

onde Z é uma cadeia de Markov que pode tomar um valor em um conjunto possível de estados.  $(T_n - T_{n-1})$  representa a variável aleatória do tempo de transição entre dois estados, com uma distribuição de probabilidade definida. Neste caso, a variável t representa o número de transições concorrentes.

Considerando o problema específico de análise de risco, às probabilidades de transição correspondem funções de densidade de probabilidade da falha (f(t)) (RODRIGUEZ e SOUZA, 2011). Analogamente, as taxas de transição correspondem à probabilidade de que o sistema ou componente falhará, dado que ainda não falhou. Esta probabilidade condicional, que em análise de confiabilidade é chamada de taxa de falha (eq. (3.9) e pode ser definida, em termos do tempo de transição entre dois estados  $\lambda_{ii}$ , como sugere a eq. (3.27) (OUHBI e LIMNIOS, 1997):

$$\lambda_{ij}(t)dt = P\{Z(T_n) = j \cap T_n - T_{n-1} \in (t + dt) | Z(T_n) = i \cap T_n - T_{n-1} > t\}$$
(3.27)

A definição dada na eq. (3.27) significa que a probabilidade de uma transição para o estado j ocorre imediatamente depois que o processo tenha estado durante t no estado i, dado que nenhuma transição deixando o estado i tenha ocorrido anteriormente. A eq. (3.28) mostra as taxas de transição da forma Semi-Markov Kernel combinando as definições de taxa de falha e de probabilidades de transição (BECKER, CAMARINOPOULOS e ZIOUTAS, 2000):

$$q_{ij}(t) = \lambda_{ij}(t) = \frac{f_i(t)}{1 - F_i(t)} = \frac{\dot{q}_{ij}(t)}{1 - q_i(t)}$$
$$q_{ij}(t) = p_{ij} \cdot F_i(t)$$
(3.28)

onde  $F_i(t)$  representa a probabilidade de falha do sistema (função acumulada) quando este está no estado i.

## 3.3.2.2. *Modelagem e Equacionamento*

No caso de um processo Semi-Markov de tempo contínuo, o sistema pode passar de um estado a outro em qualquer instante do tempo e não necessariamente de um período específico a outro. Neste ponto, torna-se essencial considerar as taxas de falha, mais do que a probabilidade de falha (LEITCH, 1995). Considere-se um sistema com dois estados: Operação Aceitável e Operação Inaceitável (ver Figura 3.4). Nestes dois estados, a distribuição de probabilidade de permanência em cada estado é não exponencial e, portanto, as taxas de transição são nomeadas como  $\lambda_{12}(t)$ ,  $\lambda_{21}(t)$ , que dependem da variável aleatória t, que representa o tempo de operação aceitável e/ou inaceitável.

Nestes modelos, as taxas são atributos da função de densidade de probabilidade de falha do sistema e permitem a transição entre estados. É importante lembrar que  $\lambda_{12}dt$  é a probabilidade de que o sistema que no tempo  $\mathbf{t}$  está no estado e operação aceitável mude para o outro estado no intervalo (t, t+dt), similarmente (RODRIGUEZ e SOUZA, 2011).

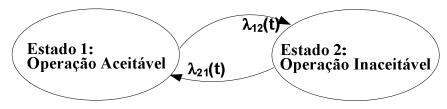


Figura 3.4 Diagrama de Markov para estados do sistema.

Na Tabela 3.2 apresentam-se as probabilidades de transição de estado para o sistema representado na Figura 3.4. Neste sentido,  $P_i(t)$  é a probabilidade do sistema estar no estado i no tempo t e  $P_i(t+dt)$  corresponde à probabilidade do sistema estar no estado i no tempo (t+dt), com i=0,1,2 possíveis estados do sistema (RODRIGUEZ e SOUZA, 2011).

Tabela 3.2. Probabilidades de transição.

		Est	ado no tempo t
		1	2
Estado no tempo	1	$1 - \lambda_{12}dt$	$\lambda_{21}dt$
t+dt	2	$\lambda_{12}dt$	$1 - \lambda_{21}dt$

Do ponto de vista do risco, se o sistema opera em condições normais, sempre estará na condição de operação aceitável e será a ocorrência de falhas ou condições anormais de operação que podem causar que o sistema passe para uma condição de operação inaceitável. Por exemplo, pode-se afirmar que a probabilidade do sistema estar no estado 1 no tempo (t+dt) compõe-se de duas probabilidades: a primeira indica a probabilidade do sistema se encontrar no estado 1 no tempo t, ponderada com a probabilidade de que no próximo intervalo continue no mesmo estado; a segunda corresponde à probabilidade do sistema se encontrar no estado 2 em um tempo t, ponderada com a probabilidade de uma mudança de estado no próximo intervalo (PALACIOS, et al. 2009). Nas eq.(3.29) e (3.30), é demonstrado o equacionamento para o caso sob análise:

$$P_{1}(t+dt) = P_{1}(t) \cdot (1-\lambda_{12}) + P_{2}(t) \cdot (\lambda_{21}) \Rightarrow$$

$$\frac{P_{1}(t+dt) - P_{1}(t)}{dt} = -P_{1}(t) \cdot \lambda_{12} + P_{2} \cdot (\lambda_{21}) \Rightarrow$$

$$\frac{dP_{1}(t)}{dt} = -P_{1}(t) \cdot \lambda_{12} + P_{2} \cdot (\lambda_{21})$$
(3.29)

$$P_{2}(t+dt) = P_{1}(t) \cdot (\lambda_{12}) + P_{2}(t) \cdot (1-\lambda_{21}) \Rightarrow \frac{P_{2}(t+dt) - P_{2}(t)}{dt} = P_{1}(t) \cdot \lambda_{12} - P_{2} \cdot (\lambda_{21}) \Rightarrow \frac{dP_{2}(t)}{dt} = P_{1}(t) \cdot \lambda_{12} - P_{2} \cdot (\lambda_{21})$$
(3.30)

Quando as taxas de transição são constantes, é possível transformar as equações diferenciais em equações lineares usando a Transformada de Laplace, e uma vez definidas as condições iniciais do sistema, obter-se a probabilidade do sistema estar em um estado ou outro, mas, ainda

assim, numericamente na prática. No caso em que as taxas de falha mudem no decorrer da operação, é possível empregar o equacionamento descrito acima, assumindo que as taxas de falha são constantes em intervalos de tempo muito pequenos (PERMAN, SENEGACNIK e TUMA, 1997).

## 3.4. MODELO DE DECISÃO SOB INCERTEZA

Pode-se afirmar que o objetivo de uma análise de risco é fornecer informação para a tomada de decisão. As decisões normalmente incluem aspetos técnicos, econômicos, sociais e, em algumas ocasiões, até culturais, portanto, existe uma clara dificuldade para a tomada de decisão (AVEN e KORTE, 2003). Embora esta dificuldade esteja sempre presente, a tomada de decisão faz-se necessária e existem diversas estratégias de análise para a realização desta tarefa que são apresentadas no decorrer desta seção.

Por outro lado, a expressão teoria da decisão é utilizado de forma muito genérica e interdisciplinar, devido, talvez, à necessidade de se tomar decisões em todas as áreas do conhecimento. Porém, em termos gerais, pode-se afirmar que a teoria de decisão é uma disciplina que usa ferramentas estatísticas envolvendo e explorando a estrutura do processo de tomada de decisão (MIGON e LOPES, 2002).

O tipo de decisão é classificado conforme o estado de conhecimento dos efeitos de tomar uma decisão, sendo definidas quatro categorias: Decisão sob certeza, Decisão sob risco, Decisão sob incerteza e, Decisão sob conflito.

A "decisão sob certeza" dá-se quando o resultado da decisão tem probabilidade de ocorrência igual a um, então cada ação resulta em um efeito totalmente conhecido; a "decisão sob risco" acontece quando, embora não se tenha certeza do evento resultante da decisão, cada efeito associado com uma ação tem uma probabilidade de ocorrência conhecida; a "decisão sob incerteza" ocorre quando não é conhecida a probabilidade de ocorrência dos efeitos associados com uma ação; finalmente, a "decisão sob conflito", também conhecida como teoria dos jogos, existe quando a variação dos estados dos efeitos está determinada pela ação de outros oponentes (MOORE e WEATHERFORD, 2005).

Um modelo é um conjunto de regras ou equações que descrevem o comportamento de um sistema. Deste modo, todos os modelos devem refletir a estrutura lógica do sistema e representar na maior medida possível o comportamento real do mesmo, sem deixar de lado que as hipóteses a serem consideradas têm efeitos sobre o modelo e, portanto devem ser levadas em conta nas conclusões e decisões finais (LEITCH, 1995).

Reconhecendo que a incerteza associada a um sistema pode ser uma medida de probabilidade, o modelo de decisão estará focado em analisar várias alternativas e determinar aquela que otimiza a relação custo-probabilidade, lembrando que o custo mede as consequências ou perda de um determinado cenário e a probabilidade está associada com a chance de este cenário acontecer.

Um primeiro modelo é baseado em compreender o problema básico de decisão como um problema de otimização de uma função objetiva expressa em termos de variáveis de decisão. No entanto, a aplicabilidade deste modelo é limitada, pois para otimizar matematicamente a função, é preciso que esta seja contínua e em muitos casos esta condição não é possível de cumprir. Além disso, a informação que envolve o processo de tomada de decisão envolve diferentes tipos de evidência que nem sempre podem ser expressos em termos de funções matemáticas (SANCHEZ, 2005).

Um segundo modelo consiste em formular o problema de decisão como um processo para selecionar uma ação x entre várias opções possíveis. Na prática, este conjunto de alternativas corresponderá a um conjunto limitado pela experiência do analista, deixando unicamente aquelas alternativas potencialmente ótimas.

Cada ação terá uma medida numérica associada ao par custo-probabilidade (MOORE e WEATHERFORD, 2005).

Neste estudo, será usado este segundo modelo, já que é uma estratégia cuja flexibilidade e versatilidade fornecerão um estado de conhecimento mais completo e adequado para a análise de sistemas complexos.

#### 3.4.1. Decisões Baseadas em Valor Esperado

A análise de valor esperado é adequada quando são usados os mesmos atributos para todas as variáveis de decisão. O valor esperado de qualquer variável aleatória pode ser definido como a média de uma função densidade de probabilidades da variável aleatória (KUMAMOTO e HENLEY, 1996).

Considere-se uma situação em que é necessário tomar uma decisão para a qual existam n alternativas ( $a_i$ ) e cada alternativa conduza a m cenários diferentes. Então, a melhor alternativa é aquela que maximiza ou minimiza o valor esperado apresentado na eq. (3.31) (SANCHEZ, 2005):

$$Decisão = \Psi_{1 \le i \le n} \sum_{j=1}^{m} P_{ij} \cdot c_{ij}$$
 (3.31)

onde  $\Psi$  representa o critério de decisão que comumente corresponde a maximizar ou minimizar a função e  $P_{ij}$  representa a probabilidade de ocorrência de cada cenário cuja consequência é  $c_{ij}$ . A

decisão é obtida otimizando-se o valor esperado. Cabe ressaltar que a definição do valor esperado corresponde à definição de risco dada na eq. (2.1).

#### 3.4.2. Valor Esperado Baseado em Evidência

Neste caso, a decisão final é o resultado de avaliações sucessivas, como mostra a Figura 3.5. O cálculo do valor é realizado com uma abordagem bayesiana (MIGON e LOPES, 2002).

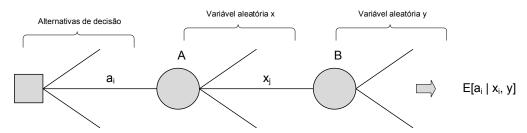


Figura 3.5 Análise de informação baseada em informação existente (SANCHEZ, 2005)

Como mostra a Figura 3.5, as saídas dos nós de probabilidade **A** e **B** são valores de uma variável aleatória **X**, **Y** respectivamente. Assim, o valor esperado da alternativa  $a_i$ , dado que  $\mathbf{X} = x_j$ , pode ser calculado usando uma abordagem bayesiana, como mostra a eq.(3.32):

$$E(a_i) = E(a_i|x_j) \cdot p(x)$$

$$E(a_i) = \int \left(\int_{-\infty}^{\infty} E(a_i|x_j, y) f_Y(y) dy\right) f_X(x)$$
(3.32)

## 3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem matemática apresentada neste capítulo possibilita abordar os quatro componentes da PRA de forma tal que a análise considere as características dos sistemas como o julgamento de especialistas, eventos de baixa probabilidade e com poucos dados disponíveis e a mudança de estado no decorrer da operação.

Os fundamentos mostrados em relação à modelagem bayesiana, de Markov e processo de decisão são necessários para o entendimento da proposta de avaliação probabilística de risco dinâmica. Em geral, toda esta modelagem foi desenvolvida com o intuito de apoiar o processo de tomada de decisão e no próximo capitulo será mostrado como incluí-la nos modelos de análise de risco que não sejam estáticos e que considerem a possibilidade de um sistema poder mudar de um estado aceitável de operação para um estado inaceitável de operação.

A aplicação da modelagem matemática tem uma abrangência maior para entender e modelar sistemas complexos. Além disso, a análise da integração entre avaliação probabilística de risco, a inferência bayesiana e análise de Markov proporcionará uma potente ferramenta para a análise deste tipo de sistemas. Neste contexto, modelar os sistemas usando os fundamentos aqui apresentados é uma contribuição muito importante para que os modelos de risco sejam muito mais próximos à realidade e, assim, consigam minimizar os perigos e suas consequências, como será apresentado no capítulo seguinte.

# CAPÍTULO 4 PROPOSTA DE MODELO DE AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DE RISCO PARA A TOMADA DE DECISÃO EM SISTEMAS DE SEGURANÇA CRÍTICA

# 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No contexto desta pesquisa, foi desenvolvido um método de análise probabilística de risco para sistemas complexos quando existem eventos externos e internos que afetam o desempenho do sistema. Este método considera que os eventos fazem parte de uma sequência de eventos de perigo, cujos efeitos podem ser alterados pela mudança inesperada das condições nas quais a operação se iniciou e resultar em consequências graves para o sistema.

Neste contexto, o método desenvolvido inclui modelos que possibilitam identificar as falhas que afetam a funcionalidade do sistema e estimar as probabilidades, considerando as relações causas-consequências, bem como identificar os fatores e pontos vulneráveis, visando minimizar a probabilidade de ocorrência e seu impacto, tanto no âmbito ambiental quanto para a operação e as pessoas envolvidas na mesma. Isto tudo com o objetivo de obter uma representação mais realista da natureza dinâmica das interações dentro do sistema, com uma alta capacidade de apoiar a tomada de decisão quando ocorrerem mudanças no decorrer da operação.

Deste modo, propõe-se um modelo híbrido para a análise de risco baseado na integração de árvore de eventos, árvore de falhas, bem como análise bayesiana, de Markov e de decisão. O método proposto incorpora os efeitos das mudanças de estado, possibilitando a obtenção da probabilidade de que um cenário de falha aconteça dado um evento iniciador. Será estabelecido um modelo matemático que permita relacionar as probabilidades de ocorrência e das consequências, e este será avaliado utilizando metodologias e procedimentos existentes, explicados no Capítulo 3, bem como a experimentação e a simulação numérica destes sistemas.

Diante do exposto, neste capítulo apresentam-se os processos que envolvem o uso de várias ferramentas e métodos para criar uma metodologia onde claramente pode-se seguir uma estrutura com uma lógica sequencial que atenda aos objetivos e fundamentos explicados anteriormente. Assim, de forma resumida, a proposta é apresentada na Figura 4.1, onde são ressaltadas as contribuições e principais diferenciadores dos outros métodos.

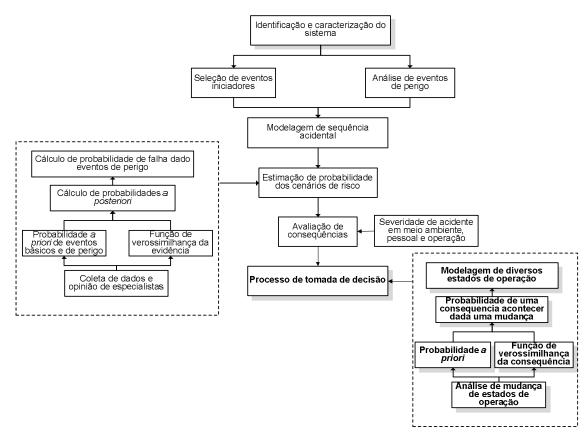


Figura 4.1 Fluxograma resumido do método proposto.

A metodologia pode ser resumida em quatro estágios: o primeiro corresponde à "Identificação e Modelagem dos Cenários de Risco" que inclui a identificação e caracterização do sistema, visando a seleção do evento iniciador, bem como a análise dos eventos de perigo; o segundo estágio é denominado de "Estimação da Probabilidade dos Cenários de Risco", no qual, utilizando-se técnicas bayesianas, é obtida a probabilidade de que um determinado cenário de risco aconteça; posteriormente, o terceiro estágio corresponde à avaliação das consequências. Com estes três estágios é realizada a avaliação do risco que auxilia a tomada de decisão, considerando mudanças entre diferentes estados de operação e modelando as transições entre estes estados. Esta avaliação é uma abordagem das duas dinâmicas envolvidas sistema. Α refere-se que estão no primeira à dinâmica do sistema e à análise da chance de que as condições operacionais mudem no decorrer do processo, e a segunda dinâmica considera a atualização de probabilidades quando existem novas evidências. Esta abordagem corresponde à principal inovação do método.

A eq. (4.1) mostra o modelo matemático para encontrar a probabilidade de que ocorra uma consequência  $K_i$  dado que o sistema mudou do estado  $S_i$  ao estado  $S_i$ .

$$P(K_j|S_{ij}) = \frac{P(S_{ij}|K_j) \cdot P(K_j)}{P(S_{ij})}$$
(4.1)

onde  $P(S_{ij}|K_i)$  é a probabilidade de que o sistema mude do estado  $S_i$  ao estado  $S_j$ , considerando a ocorrência de uma consequência  $K_i$ .  $P(K_i)$  representa a probabilidade de que os cenários de falha conduzam a uma consequência  $K_i$ . O modelo matemático em detalhe será explicado posteriormente.

A avaliação dos quatro estágios da análise probabilística de risco tem como objetivo determinar os fatores do modelo matemático. Portanto, obtém-se um modelo de tomada de decisão para sistemas complexos que utiliza a avaliação dinâmica do risco.

# 4.2. IDENTIFICAÇÃO E MODELAGEM DOS CENÁRIOS DE RISCO

A análise de risco envolve a prevenção da ocorrência de cenários adversos e o fomento de cenários favoráveis e, por conseguinte, entender e modelar estes cenários torna-se fundamental.

A modelagem dos cenários de risco é o resultado de três processos sequenciais: 1) identificação e caracterização do sistema; 2) identificação de eventos de perigo e 3) modelagem da sequência acidental.

#### 4.2.1. Identificação e Caracterização do Sistema

Antes de iniciar qualquer atividade em relação à análise de risco, é preciso conhecer o sistema e entender como o acidente acontece desde a ocorrência do evento iniciador até a propagação dos efeitos e as consequências finais. Deste modo, é necessário definir e entender as características físicas e funcionais do sistema (BAHR, 1997).

Esta fase inicia-se com a definição dos objetivos de operação do sistema e dos objetivos da análise de risco. Estas atividades são muito importantes, já que nem todos os eventos iniciadores têm as mesmas consequências e sua seleção para uma análise mais detalhada será decorrência direta da ação de traçar estes dois objetivos.

Para definir o objetivo da operação do sistema, é necessário coletar informações a fim de caracterizar a situação atual, bem como definir as necessidades e as restrições operacionais do sistema. Desta forma, é preciso reunir e estudar as informações relevantes sobre o funcionamento do sistema para permitir a familiarização com a sua operação. Este compêndio de informações deve incluir desenhos do projeto e operação, assim como também, manuais e procedimentos de

emergência. Em seguida, são analisados os subsistemas principais, suas funções e seu desempenho esperado, assim como também as interações que existem entre os subsistemas.

A segunda atividade está direcionada a definir os objetivos de aceitação de risco, tais como os impactos toleráveis e suas respectivas metas relativas à disponibilidade da operação, à segurança ambiental e à segurança humana (ABS, 2000).

A análise do sistema deve incluir a descrição dos procedimentos normais de operação e de emergência e a identificação de sistemas de alarme e de segurança. Algumas das técnicas que auxiliam este processo de forma estruturada e sistemática são a análise funcional e matrizes de dependência (STAMATELATOS, 2002).

O desenvolvimento destas duas atividades permite definir o evento iniciador ou desencadeador de uma sequência acidental.

## 4.2.2. Identificação de Eventos de Perigo

A identificação de perigos é um processo no qual são pesquisadas as ameaças que existem sobre o sistema, examinando-se sistematicamente todos os elementos que já foram identificados, visando executar os objetivos definidos na etapa anterior. Neste ponto, é necessário entender o que compreende um perigo, como reconhecê-lo e como defini-lo, além de compreender a natureza dos riscos, sua relação com os acidentes e seus efeitos sobre a operabilidade, disponibilidade e/ou integridade do sistema.

Nesta etapa são identificados os eventos que poderiam conduzir a acidentes tais como: explosão, incêndio, colisão, alagamento, entre outros. Estes perigos constituirão os eventos da análise da sequência acidental.

A identificação dos perigos visa listar os perigos e cenários associados, priorizados pelo nível de risco específico para o problema que se está estudando. Usualmente, a identificação dos perigos compreende a combinação de técnicas criativas e analíticas com o objetivo de identificar tanto as situações que já ocorreram quanto as que podem acontecer. Nesta etapa, também são analisadas as relações causais e os possíveis resultados de cada incidente considerado. Uma vez identificados os perigos e os cenários associados, estes podem ser classificados, priorizados e, até mesmo, podem ser descartados os cenários considerados menos relevantes.

A análise de risco visa detalhar a investigação das causas e consequências dos cenários mais importantes de operação, identificados na etapa da caracterização do sistema. Isto

permite que a atenção do analista esteja voltada para os eventos de alto risco e para a identificação e análise de fatores que possam influenciar no nível do risco.

Algumas abordagens focam a análise no mecanismo de início de um acidente ou na população ameaçada. Do mesmo modo, existem outras abordagens que focam na revisão de critérios de segurança e análise de causas dos acidentes.

No caso em que a "identificação de perigos" esteja focada no mecanismo iniciador, a análise de risco está destinada a revisar, com detalhe, os elementos, componentes ou subsistemas que podem ser o "gatilho" dos acidentes na operação do sistema. Na outra abordagem, relaciona-se a identificação de perigos com as consequências, os efeitos finais que poderiam ocasionar os eventos indesejados.

Independente da abordagem utilizada, as técnicas mais habituais aplicadas nesta fase da análise são HAZOP, Análise Preliminar de Perigos (PHA) e a Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA), cujas características foram explicadas no decorrer do Capítulo 2.

#### 4.2.3. Modelagem da Sequência Acidental

Esta etapa relaciona os eventos de perigo, identificados na etapa anterior, com a sequência de eventos que pode conduzir a um acidente. O objetivo é usar ferramentas indutivas e lógicas que permitam entender a forma como o acidente se propaga, começando com o evento iniciador e progredindo em um determinado cenário, por meio de uma série de acontecimentos ou falhas, denominadas de eventos de perigo, como mostra a Figura 4.2.

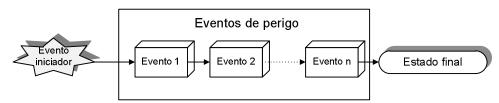


Figura 4.2 Conceito sequência acidental (adaptado de ERICSON, 2005).

A sequência acidental é baseada na relação causa e efeito e sua modelagem estabelece conjuntos mínimos de eventos de perigo cuja sequência são caminhos críticos que conduzem a um estado final. Além disso, este estágio permite analisar a operação de sistemas de segurança ou barreiras que deveriam atuar em um ponto determinado da sequência acidental para evitar a propagação dos eventos de perigo.

As técnicas mais apropriadas para desenvolver esta fase da PRA são os diagramas sequenciais de eventos, que, em muitos casos, correspondem às fases preliminares das árvores de eventos e da análise causa-consequência.

Em resumo, a etapa de "Identificação e Modelagem dos Cenários de Risco" visa entender e representar os cenários de progressão de um acidente. Assim, esta fase é baseada na ocorrência de eventos críticos e refere-se aos três processos aqui explicados.

A Figura 4.3 mostra as ferramentas selecionadas para o desenvolvimento deste estágio. A análise funcional e/ou a matriz de dependências possibilitarão a caracterização do sistema. Em seguida, são estabelecidos os efeitos possíveis dos diferentes eventos que causam falhas na operação do sistema e, portanto, é necessário identificar todas as possíveis respostas do sistema dado um evento iniciador. Dadas as vantagens e resultados que oferecem, tanto a FMEA como a PHA foram consideradas como as técnicas mais adequadas para abordar esta questão. A FMEA deverá ser usada quando a análise de risco esteja voltada a analisar pontos vulneráveis em sistemas de manutenção bem como define as possíveis falhas e os sintomas de falhas serão os eventos de perigo. A PHA será mais utilizada quando o objetivo da análise de risco esteja voltado à análise processos e a segunda coluna da planilha identifica diretamente os eventos de perigo. O analista tomará a decisão de qual destas duas técnicas resulta ser mais apropriada, em função das informações e recursos de análise disponíveis.

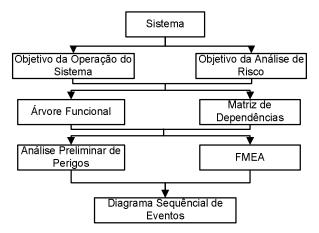


Figura 4.3 Fluxograma para a modelagem da sequência acidental.

No desenvolvimento do diagrama sequencial de eventos, a ordem no qual os eventos de perigo acontecem pode corresponder às ações temporais do sistema para continuar funcionando, ou seja, a análise funcional auxiliará nesta decisão, já que após identificar o evento do início é necessário investigar as relações funcionais dos componentes, que determinará a sequência acidental. Em seguida, e como resultado da PHA ou FMEA e da definição do objetivo do risco, são definidos os estados finais ou consequências de cada uma das sequências acidentais.

Neste ponto, é necessário analisar a sequência acidental para determinar caminhos que possam ser considerados equivalentes ou irrelevantes e, então, estes deverão ser removidos da análise, causando uma redução no diagrama e uma simplificação nos procedimentos das fases subsequentes. Esta redução é conseguida cruzando a informação da análise funcional e do PHA/FMEA, já que consequências equivalentes geradas com sequências acidentais iguais poderão ser reduzidas e agrupadas.

## 4.3. ESTIMAÇÃO DA PROBABILIDADE

Após identificar e modelar os possíveis cenários de falha, torna-se fundamental avaliar probabilisticamente a frequência com que ocorrem as falhas. A avaliação probabilística é realizada analisando as falhas dos componentes do sistema que geram os eventos de perigo. Portanto, propõe-se desenvolver, para cada evento de perigo, uma análise de árvore de falha. Assim, a probabilidade destes eventos é quantificada através de funções de densidade de probabilidade dos eventos básicos de cada árvore. As funções de probabilidade são calculadas a partir de dados históricos de falha e opinião de especialistas.

Usualmente, os eventos indesejados em sistemas complexos de segurança crítica são eventos raros e, portanto, torna-se necessário estimar estas probabilidades usando métodos bayesianos (Capítulo 3). Consequentemente, é desenvolvida a função *a priori* que descreve o estado de conhecimento prévio sobre cada evento básico, é incorporada a nova informação através da coleta da evidência e é construída a função de verossimilhança. Finalmente, é calculada a nova probabilidade aplicando-se o teorema de Bayes. Esta nova probabilidade corresponde à probabilidade *a posteriori*, que descreve o conhecimento sobre o evento básico após a obtenção de novas informações.

Nesta proposta, optou-se por usar a distribuição *a posteriori* conjugada já que torna a análise mais tratável, permitindo explorar a natureza sequencial do método bayesiano (MIGON e LOPES, 2002). As famílias conjugadas usadas na avaliação probabilística do risco são apresentadas na Tabela 4.1.

Verossimilhança L(Elθ) A Posteriori P(θ|E) A Priori  $P_0(\theta)$ Beta  $(\alpha, \beta)$ Binomial (r, n) Beta ( $\alpha$ +r,  $\beta$ +n+r)  $\frac{\frac{n}{r!(n-r)!}x^r(1-x)^{n-r}$  $\frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{(1-x)^{\beta-1}} \cdot x^{\alpha-1} \cdot (1-x)^{\beta-1}$  $\frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{}$   $\cdot x^{\alpha-1} \cdot (1-x)^{\beta-1}$  $\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)$  $\Gamma(\alpha)\cdot\Gamma(\alpha)$ Gama ( $\alpha' = \alpha + r$ ,  $\beta' = \beta + t$ ) Gama  $(\alpha,\beta)$ Poisson (x) $(x \cdot t)^r$  $\frac{1}{2}e^{-\beta'\cdot x}$  $-e^{-\beta \cdot x}$ 

Tabela 4.1 Famílias conjugadas (LINDLEY, 1965).

Para selecionar a função *a priori* e de verossimilhança foram selecionadas as famílias conjugadas cuja principal vantagem é a possibilidade de obter cálculos em forma fechada. Além disto, estas distribuições são flexíveis o suficiente para acomodar as crenças do tomador de decisão (MIGON e LOPES, 2002).

Na sequência deste texto é mostrado o procedimento para construir a função *a posteriori* como uma família conjugada.

Supondo que  $f(x|\theta)$  corresponde à densidade condicional de x dado  $\Theta=\theta$ ,  $\pi(\theta)$  corresponde à função *a priori*, q(x) é a função marginal de x, e  $\pi(\theta|x)$  corresponde à densidade condicional de  $\theta$  dado que X=x que equivale à densidade a posteriori de  $\theta$ , e pode ser escrita como mostra a eq. (4.2).

$$\pi(\theta|x) = \frac{f(x|\theta) \cdot \pi(\theta)}{q(x)} \Rightarrow$$

$$\pi(\theta|x) \propto f(x|\theta) \cdot \pi(\theta)$$
(4.2)

No caso utilizado no Capítulo 5,

$$f(x|\lambda) = \frac{(\lambda t)^r}{r!} e^{-\lambda t}$$

$$\pi(\lambda) = \frac{\lambda^{\alpha - 1}}{\Gamma(\alpha)} e^{-\beta \cdot \lambda}$$

$$q(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x|\lambda) \cdot \pi(\lambda)$$

$$\therefore \pi(\lambda|x) = \frac{f(x|\lambda) \cdot \pi(\lambda)}{q(x)}$$
onde,  $f(x|\lambda) \cdot \pi(\lambda) = \frac{(\lambda t)^r}{r!} e^{-\lambda t} \cdot \frac{\lambda^{\alpha - 1}}{\Gamma(\alpha)} e^{-\beta \cdot \lambda}$ 

Assim, após estimar a probabilidade *a posteriori* para cada evento básico representado na árvore de falhas, a probabilidade de ocorrência de cada evento de perigo é obtida resolvendo a árvore de falhas, da forma como foi explicado na seção 2.3.2.1, considerando que a ocorrência de falha de cada evento básico é independente e segue a função densidade de probabilidade *a posteriori* encontrada.

Após obter a probabilidade de ocorrência de cada evento de perigo, é calculada a probabilidade de ocorrência de um determinado cenário. Para avaliar esta probabilidade

utiliza-se a análise causa-consequência, que resulta da combinação dos métodos de cálculo do FTA e da Árvore de Eventos, como é mostrado esquematicamente na Figura 4.4.

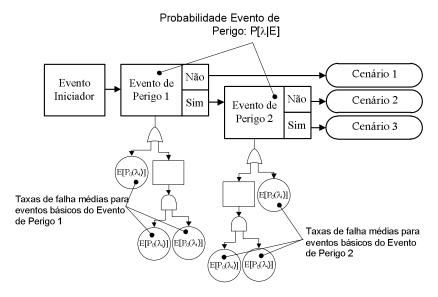


Figura 4.4 Framework do método para estimar as probabilidades de ocorrência.

Para o caso de independência entre os eventos de perigo que pertencem ao caminho que está sendo avaliado, a probabilidade de cada cenário de falha é determinada por multiplicação simples da probabilidade destes eventos e, para o caso de dependência entre os eventos, os métodos de probabilidade condicional devem ser usados. A Figura 4.5 resume as diferentes atividades que envolvem a obtenção do segundo componente do método de análise.

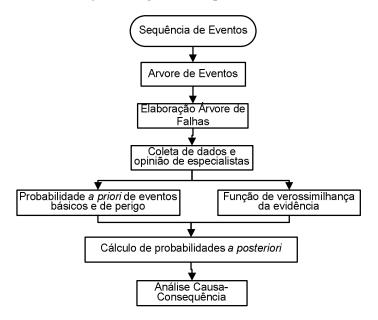


Figura 4.5 Fluxograma para obter a estimação das probabilidades.

Por fim, no final desta fase é obtida a probabilidade de que um determinado cenário de falhas aconteça. A análise probabilística do risco pode ser entendida como uma ferramenta que avalia quantitativamente as consequências da ocorrência de um evento indesejado. Desta forma, usando os resultados até aqui obtidos, a probabilidade de uma consequência é determinada somando-se a probabilidade dos cenários de risco que conduzem à mesma consequência, sendo possível determinar o risco como uma função destas consequências e da probabilidade de que um acidente aconteça em um período determinado de operação do sistema, como mostra a Figura 4.6.

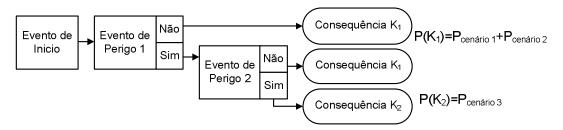


Figura 4.6 Calculo da probabilidade de uma consequência acontecer.

# 4.4. AVALIAÇÃO DAS CONSEQUÊNCIAS

As perdas principais estão associadas com a perda de tempo de produção. Uma falha crítica em sistemas complexos de segurança crítica acarreta longos tempos de parada e custos elevados pela perda de produção, custo de mobilização de recursos e intervenção, assim como também os custos de reparo e reposição e até mesmo multas associadas ao não cumprimento de contratos, ou a um possível desastre ambiental e a possíveis lesões para o contingente humano envolvido na operação.

Assim, deve-se estabelecer uma forma de medir quantitativamente a magnitude das consequências e, para isto, as ferramentas usadas para a avaliação probabilística do risco, como a função utilidade que tem a capacidade de criar uma função para medir a magnitude das possíveis consequências resultantes da ocorrência dos eventos de perigo.

## 4.4.1. Função Utilidade

Existem situações de tomadas de decisão onde modelos baseados na otimização de um valor esperado associado com um processo de escolha não são adequados para definir a preferência por uma determinada ação em detrimento de outra. Nesta situação, usa-se outra medida de preferência dos efeitos das ações que expresse de forma mais adequada os desejos do usuário, chamada de Função Utilidade.

O conceito de utilidade foi introduzido por Daniel Bernoulli (1738) para explicar os afastamentos da regra de decisão pelo valor esperado. A utilidade, em alguns casos, também é importante por permitir a incorporação, no processo decisório, do perfil da pessoa que toma a decisão, classificado em: Apetite ao risco, Neutralidade ao risco ou Aversão ao risco (SANCHEZ, 2005).

A Função Utilidade surge como uma forma de medir globalmente os efeitos de uma decisão e normalmente varia de zero a um, porém pode ter outra escala, bem como também pode ser analítica ou tabular. No caso em que a função seja utilizada para múltiplos objetivos ou para diferentes variáveis, é aconselhável que a escala da função utilidade esteja padronizada (BEKMAN e COSTA NETO, 2002).

A função tem a propriedade de ordenabilidade, expressa da seguinte forma: suponha que  $u(\bullet)$  represente a função utilidade de um evento e possua efeitos  $E_n$ :

Se 
$$E_1 > E_2 > ... > E_n$$
, então  $u(E_1) > u(E_2) > ... > u(E_n)$   
Se  $E_1 = E_2 = ... = E_n$ , então  $u(E_1) = u(E_2) = ... = u(E_n)$   
Se  $E_1 < E_2 < ... < E_n$ , então  $u(E_1) < u(E_2) < ... < u(E_n)$ 

A função de utilidade é obtida observando-se os valores monetários associados aos vários cenários listados na árvore de decisão. Organizam-se os efeitos em ordem crescente de preferência do menos desejado ao efeito mais desejado, por exemplo,  $E_1 > E_2 > ... > E_n$ . Na sequência, o efeito menos desejado ( $E_1$ ) tem sua utilidade definida pelo valor zero, ou seja,  $u(E_1) = 0$  e o efeito mais desejado ( $E_n$ ) tem a sua utilidade definida pelo valor um, ou seja,  $u(E_n) = 1$ . A utilidade de um efeito intermediário utiliza um valor p que se torna indiferente à decisão pelos efeitos E e é calculada como mostra a eq. (4.3) (MIGON e LOPES, 2002):

$$E(E_{n-k}) = p \cdot u(E_1) + (1-p) \cdot u(E_n)$$
(4.3)

A definição da probabilidade *p* pode ser realizada por meio da informação existente, julgamentos subjetivos ou aproximação bayesiana. No primeiro caso, a probabilidade pode ser definida usando a frequência relativa da ocorrência dos eventos observados; no segundo caso, é uma definição direta do analista, baseada na experiência deste; no terceiro caso, trata-se de uma atualização da informação existente através de novas informações (MIGON e LOPES, 2002).

A função de utilidade também pode ser construída com o emprego de um modelo matemático que gera uma família de curvas. Os modelos mais utilizados são mostrados na Tabela 4.2 onde r,  $\alpha$  e  $\beta$  são medidas do grau de aversão ao risco.

Função Utilidade	Função Padronizada
Exponencial	$u(x) = \frac{1 - e^{-rx}}{1 - e^{-r}}$
Logarítmica	$u(x) = \frac{ln(x+\beta) - ln(\beta)}{ln(1+\beta/\beta)}$
Quadrática	$u(x) = \frac{2x - \alpha x^2}{2 - \alpha}$

Tabela 4.2 Funções de Utilidade (SANCHEZ, 2005)

As funções de utilidade são descritas como funções contínuas. Usualmente, o aumento marginal da utilidade decresce com o aumento do valor do atributo e, portanto, as funções de utilidade normalmente são convexas. Note-se que quando  $\mathbf{r}$  aumenta, a aversão ao risco aumenta. No caso da função logarítmica, o parâmetro  $\boldsymbol{\beta}$  define o grau de aversão e na medida em que  $\boldsymbol{\beta}$  aumenta, a aversão ao risco diminui (KUMAMOTO e HENLEY, 1996).

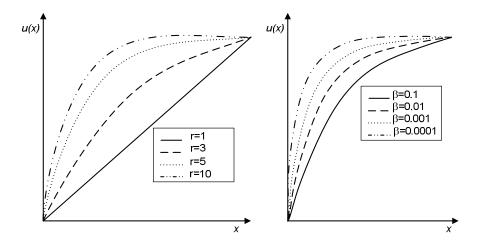


Figura 4.7 Função de utilidade exponencial e logarítmica para diferentes valores de parâmetros (SANCHEZ, 2005).

#### 4.5. A TOMADA DE DECISÃO

As componentes do método até aqui avaliadas têm a capacidade de incluir novas informações na modelagem probabilística, mas ainda não consideram as características dinâmicas das operações em sistemas complexos e de segurança crítica.

Nesta pesquisa, considerou-se que a principal característica dinâmica nestes sistemas é o fato de que as condições iniciais de operação podem mudar no decorrer da operação, fazendo com que o sistema mude de um estado de operação para outro. Usando como entradas os resultados obtidos nas etapas anteriores, é proposto o modelo de decisão apresentado na Figura 4.8.

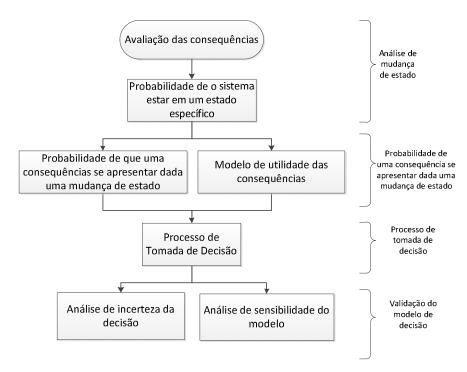


Figura 4.8 Modelo de tomada de decisão.

No modelo apresentado na Figura 4.8 podem ser identificadas quatro fases principais: 1) análise de mudança de estado; 2) a probabilidade de uma consequência se apresentar dada uma mudança de estado; 3) o processo de tomada de decisão; 4) validação do modelo de decisão. Este último componente permitirá avaliar a potencialidade do processo de decisão.

A seguir, são detalhadas estas quatro fases, explicando suas características procedimentais, bem como a seleção de ferramentas para desenvolver cada atividade.

#### 4.5.1. Análise de Mudança de Estado

A análise markoviana é uma ferramenta útil para analisar a mudança de estado. Os fundamentos teóricos, modelagem e equacionamento desta abordagem estão descritos no Capítulo 3. No entanto, para utilizar esta abordagem, é preciso fazer uma análise específica do sistema, como mostra a Figura 4.9.

O primeiro passo consiste em determinar os diferentes estados em que o sistema pode estar durante a operação e que são de interesse para a análise. O estado de um sistema é definido como

um conjunto mínimo de variáveis, cujos valores em um instante atual são necessários para determinar a evolução do sistema em um instante futuro. Essas variáveis representam as condições em que o sistema se encontra em um determinado instante.

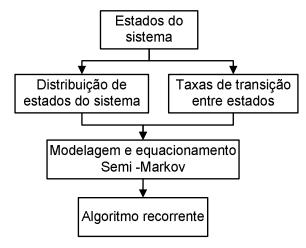


Figura 4.9 Fluxograma para analisar a mudança de estado em sistemas complexos.

Desta forma, o estado de um sistema em um instante de tempo pode ser interpretado como uma fotografia do sistema naquele instante e, em cada um destes instantes de tempo, os valores das variáveis representativas de seu estado assumem valores específicos. Enquanto esses valores permanecerem constantes, o estado permanece o mesmo. No entanto, se uma das variáveis modifica seu valor, caracteriza-se outro estado. Na análise, podem existir estados intermediários que não são relevantes para a análise e não são considerados. Assim, entre os estados incluídos na análise, a mudança de um estado para outro é denominada de transição de estado (BLANCHARD e FABRYCKY, 2011).

Após determinar os estados de interesse, é preciso estabelecer a variável que está associada com a transição do sistema. No caso desta pesquisa, esta transição de estado está associada a eventos indesejados e, portanto, deve-se determinar qual é a variável que mede a transição.

Do ponto de vista da análise de confiabilidade e risco, esta variável tradicionalmente se refere ao tempo de operação, mas também pode ser posição, ciclos de produção ou números de peça de produzidas, entre outras. Assim, por exemplo, a transição entre um estado de operação normal e outro inoperante pode ser medida por tempos de falha e tempos de reparo (PALACIOS *et al.*, 2009).

Após a coleta dos dados da variável, pode-se encontrar uma distribuição de probabilidade que se ajuste aos dados de permanência em cada estado e, desta forma, determinam-se as funções densidade de probabilidade que representarão o processo. Estas funções densidade de probabilidade são determinadas a partir de métodos tradicionais de estatística como Máxima Verossimilhança ou Mínimos Quadrados, podendo ser usados softwares estatísticos ou modelagem matemática tradicional para determinar os parâmetros destas funções densidade de probabilidade.

A determinação desta função densidade de probabilidade torna-se fundamental dentro da análise, uma vez que a taxa de falha definida a partir desta função vai reger a transição entre os estados e, portanto, a probabilidade de um sistema estar em um estado específico de operação, dadas as entradas e saídas do sistema (DROGUETT, GROEN e MOSLEH, 2006; PALACIOS, *et al.*, 2009).

As funções densidade de probabilidade, comumente usadas para avaliar eventos indesejados e falhas em sistemas complexos, são apresentadas na Tabela 4.3.

	f(t)	F(t)	$\lambda(t)$
Weibull	$\frac{\beta \cdot t^{\beta-1}}{\eta^{\beta}} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}$	$1-e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}$	$\frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$
Normal	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$\Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$	$\frac{f(t)}{1 - F(t)}$
Lognormal	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}S \cdot t} e^{-\frac{(\ln(t) - \mu_{\ln})^2}{2S^2}}$	$\Phi\left[\frac{1}{S} \cdot ln\left(\frac{t}{\mu_{ln}}\right)\right]$	$\frac{f(t)}{1 - F(t)}$

Tabela 4.3 Distribuições de probabilidade (MODARRES, 1993).

A partir deste ponto, pode ser modelado o processo Semi-Markov conforme o equacionamento apresentado na seção 3.3.2.2. Neste caso, onde as taxas de falha mudam no decorrer da operação, é possível usar o equacionamento descrito na seção 3.3.2.2, assumindo que as taxas de falha são constantes em intervalos de tempo muito pequenos, como é mostrado por Perman, Senegacnik e Tuma (1997). Deste modo, é proposto um algoritmo recorrente que usa a discretização da taxa de falha, o que permitirá obter as probabilidades de estado para o intervalo Δt, as quais são atualizadas a partir de casos anteriores. A estrutura deste algoritmo recorrente é mostrada na Figura 4.10.

O algoritmo recorrente avalia o estado operacional do sistema em um instante de tempo e avalia, de forma específica, a probabilidade do sistema se encontrar, nesse instante, em um determinado estado de operação. Esta avaliação está condicionada ao comportamento passado que o sistema teve, uma vez que considera que as taxas de transição variam no tempo. O algoritmo realiza uma atualização contínua, ciclo a ciclo, da matriz de transição de estados, o qual implica a necessidade de mudança permanente das taxas de transferência de estado no decorrer da operação. Assim, realiza-se uma atualização sucessiva das condições iniciais, ou seja, uma atualização ciclo a ciclo, dos valores que compõem o vetor P(t), que representa a probabilidade no instante tempo t, de forma tal que os valores do vetor de probabilidade no instante de tempo seguinte,  $P(t+\Delta t)$ , tornam-se os valores iniciais do vetor de probabilidade para o próximo ciclo. Com relação ao número de iterações, estas dependem da duração da operação e do tamanho do incremento ( $\Delta t$ ).

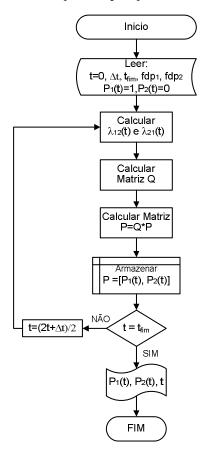


Figura 4.10 Algoritmo recorrente para o cálculo das probabilidades.

#### 4.5.2. Análise das consequências em Função das Mudanças de Estado

O método propõe um modelo matemático possibilitando a obtenção da probabilidade de que uma consequência aconteça, dado um evento iniciador.

Supondo que um sistema, durante sua operação, pode estar em i estados diferentes,  $S_i$ , e possui diferentes cenários de falhas que conduzem a consequências  $K_j$ , usando o Teorema de Bayes, é possível calcular a probabilidade de uma consequência acontecer considerando que o sistema está em um estado específico de operação, como foi mostrada na eq. (4.1):

$$P(K_j|S_{ij}) = \frac{P(S_{ij}|K_j) \cdot P(K_j)}{P(S_{ij})}$$

Como já foi mencionado antes,  $P(S_{ij}|K_i)$  é a probabilidade de que o sistema mude do estado  $S_i$  ao estado  $S_j$ , considerando a ocorrência de uma consequência  $K_i$ .  $P(K_i)$  representa a probabilidade de que os cenários de falha conduzam a uma consequência  $K_i$ .

A Figura 4.11 sugere como, a partir das etapas anteriores, é possível obter cada um dos parâmetros do modelo matemático. Assim, por exemplo,  $P(K_i)$  é o resultado da avaliação das consequências, como foi mostrado na seção anterior.



Figura 4.11 Fluxograma modelo matemático.

Depois de definido o evento iniciador e as consequências que geram os diferentes cenários de operação, pode-se determinar mais facilmente a probabilidade de que um estado de operação se apresente, considerando que um efeito sobre o sistema esteja predeterminado, usando dados históricos sobre acidentes ou usando resultados de simulações sobre o sistema analisado. Esta facilidade obedece a duas razões: 1) quando ocorre um acidente ficam registradas suas consequências, então, a partir destes dados, pode-se explorar a probabilidade de que o sistema esteja em um determinado estado de operação; 2) em programas de simulação é mais simples introduzir um efeito final e observar o estado de operação a que este evento conduz. Portanto, analisando-se estes dados, é obtida a probabilidade de que o sistema esteja em um estado específico de operação, admitindo que ocorreu uma consequência.

#### 4.5.3. Processo de Tomada de Decisão

O método proposto de avaliação probabilística do risco para a tomada de decisão incorpora os efeitos das mudanças de estado. Em termos gerais, a tomada de decisão está relacionada com a aceitação de um determinado cenário de risco.

Na análise de sistemas complexos, torna-se fundamental relacionar os modelos matemáticos com a tomada de decisão e é este último ponto que potencializa ainda mais o modelo híbrido proposto neste capítulo. Neste contexto, um aspecto importante da tomada de decisão em sistemas complexos é a necessidade de criar um modelo que possa lidar com diversas fontes de incertezas e que auxilie o entendimento de sistemas com estruturas complexas para que, assim, seja uma ferramenta que suporte a tomada de decisões.

Em geral, quando se analisam sistemas complexos e especialmente aqueles considerados de segurança crítica, existem fatores sobre os quais não se tem certeza. Portanto, nestes tipos de sistemas enfrenta-se a necessidade de selecionar uma alternativa entre várias possíveis. Neste caso, a decisão envolve o desenvolvimento de um cenário para a obtenção do efeito final e, devido ao fato de que as probabilidades de ocorrência de um evento são dependentes da ocorrência do evento anterior, o modelo de decisão sob risco não pode mais ser aplicado. Portanto, a "decisão sob incerteza" torna-se o melhor método para analisar estes sistemas (MIGON e LOPES, 2002).

Para tomar "decisões sob incerteza" existem dois conceitos fundamentais a serem levados em consideração: Risco e Incerteza. O risco foi definido no começo do capítulo e a incerteza pode ser associada a fontes como aleatoriedade nos resultados, falta de conhecimento que se tem sobre o sistema que esta sendo analisado, ou estimações estatísticas realizadas sobre o sistema e na modelagem dos mesmos. A incerteza associada com a decisão provém da dificuldade em saber com exatidão se um evento já aconteceu realmente. Em termos gerais, a incerteza tem uma relação direta com a dificuldade na definição do sistema e a disponibilidade de informação (SANCHEZ, 2005), levando em consideração que as consequências correspondem aos estados finais da análise de sequência acidental.

Inicialmente estes estados são medidos em termos de perdas referentes à perda econômica, danos, lesões, perda de produção ou desempenho e são habitualmente expressos em termos monetários. Normalmente, estes custos decorrentes da ocorrência de um evento indesejado são estimados, na maioria de vezes, em função da experiência dos operadores e dos dados históricos sobre as perdas monetárias em acidentes. Portanto, considera-se que a ferramenta mais adequada para abordar a decisão deste ponto de vista é a árvore de decisão.

Neste mesmo contexto, considera-se o método de utilidade como o método mais adequado para mensurar as consequências, já que este método permite valorar a distribuição de probabilidade dos possíveis resultados de uma decisão e, assim, estabelecer a preferência entre as decisões associadas a estas distribuições de probabilidade, como foi exposto na seção 3.4.3.

A partir desta informação, é possível fazer a análise de decisão. As alternativas estarão associadas à mudança ou não da estratégia de operação. Assim, por exemplo, a Figura 4.12 mostra a árvore para duas consequências e dois possíveis estados do sistema.

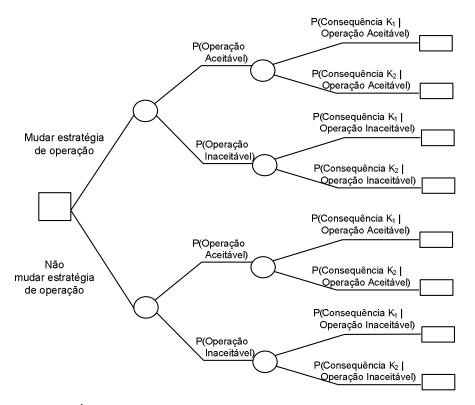


Figura 4.12 Árvore de decisão sobre a mudança ou não na estratégia de operação.

Do ponto de vista probabilístico, o modelo de decisão determina a probabilidade do sistema estar em uma condição inicial e de acontecer uma consequência.

## 4.5.4. Validação do modelo de Tomada de Decisão

A análise de sensibilidade bem como a análise de incerteza tornam-se muito importantes na estruturação e solução de modelos de decisão, já que estes modelos dependem fundamentalmente de julgamentos do tomador de decisão através de suas preferências e crenças. As quantidades envolvidas no processo de decisão são de difícil especificação, especialmente no caso de vários especialistas. Portanto, resulta de fundamental importância avaliar a sensibilidade dos resultados finais a variações dos elementos da análise (MIGON e LOPES, 2002).

Uma possibilidade é analisar separadamente os efeitos da função utilidade e da distribuição de probabilidade, porém considerar isoladamente estes fatores torna-se uma grande limitação na análise de sensibilidade. Idealmente, deve-se analisar o efeito simultâneo de imprecisões na distribuição de probabilidade e no valor das consequências. Estas análises rapidamente tornam-se computacionalmente complexas, portanto é boa prática realizar análise de sensibilidade avaliando somente alguns pares de valores da probabilidade e das utilidades, como é mostrado no exemplo a seguir (MIGON e LOPES, 2002).

Assim, por exemplo, no caso de haver um problema de decisão com duas alternativas de decisão e dois estados da natureza, como apresentado na Tabela 4.4.

rabeia 4.4 Exemplo de problema de decisão										
	Estado 1 ( $\theta_1$ )	Estado 2 $(\theta_2)$								
Alternativa 1 (a <sub>1</sub> )	$U(a_1, \theta_1)$	$U(a_1, \theta_2)$								
Alternativa 2 (a <sub>2</sub> )	$U(a_2, \theta_1)$	$U(a_2, \theta_2)$								
	Probabilidade $(\pi)$	1-π								

Tabela 4.4 Exemplo de problema de decisão

Para este problema de decisão, define-se que a probabilidade de ocorrência do estado de natureza é dado  $0,4<\pi<0,6$ , as funções utilidade pode ter valores nos seguintes intervalos: -0,5<U(a<sub>1</sub>,  $\theta_1$ )<0, -0,75<U(a<sub>1</sub>,  $\theta_2$ )<-0,25, -0,75<U(a<sub>2</sub>,  $\theta_1$ )<-0,25, -1,0<U(a<sub>1</sub>,  $\theta_1$ )<-0,5. A Tabela 4.5 mostra a avaliação do risco resultante, considerando as variações extremas de  $\pi$  e das utilidades.

Tabela 4.5 Avaliação do risco para o exemplo do problema de decisão

π	$U(a_1, \theta_1)$	$U(a_1, \theta_2)$	$U(a_2, \theta_1)$	$R(U, \pi_{\theta}, a_1)$	$R(U, \pi_{\theta}, a_1)$
0,4	0	-0,25	-0,5	-0,15	-0,4
0,4	-0,5	-0,75	-1	-0,65	-0,9
0,6	0	-0,25	-0,5	-0,1	-0,35
0,6	-0,5	-0,75	-1	-0,6	-0,85

Outra variável a ser considerada na validação do modelo de decisão é o comportamento do decisor, já que este pode ter: Apetite ao risco, Neutralidade ao risco, ou Aversão ao risco. Lembrando que a aversão ao risco implica que, para um dado nível de riqueza, a utilidade adicionada por uma unidade de dinheiro é menor que a utilidade subtraída pela mesma unidade de dinheiro e, portanto, a função utilidade de um tomador de decisões que tem aversão ao risco é côncava.

# 4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir é apresentada uma tabela comparativa (Tabela 4.6) entre os diversos autores que apresentam aplicações em diversas áreas da análise de risco como ferramenta para a tomada de decisão. Na Tabela 4.6 são observadas as diferenças existentes entre o método proposto neste tese com as outras propostas, bem como as contribuições da proposta na análise de risco probabilístico.

Tabela 4.6 Comparação entre diversas aplicações de análise de risco

		IDENTIFICAÇÃO E MODELAGEM																									
AUTOR	ÁREA APLICAÇÃO		RACTER	ICAÇÃO IZAÇÃO EMA		IDENT		O EVEN	TOS DE	DA SEQUÊNCIA ACIDENTAL		ESTIMAÇÃO DA PROBABILIDAD							AVALIAÇÃO DAS CONSEQUÊNCIAS					TOMADA DE DECISÃO			
		Diagr Fluxo	Dados Histór	Àrvore Funcio	M atriz Depend	РНА	HAZOP	Análise Modos Falha	Barrera	Diag. Bloque	Diag. Sequ Event	Dados	Indepen	FTA	Depend	Redes Bayes	Simul- ação	Modelo fisico- quimico	Qualitat	ETA	Causa- Conseq	Custos	Criter Toler Risco	Qualitat	M arkov	Árvore decisão	
ANEZIRIS, PAPAZOGIOU (2000)	Química	Х									Х		Х	Х						Х					Х		
AVEN et al. (2006)	Método BORA								Х				х	Х									Х				
BARBOSA DOS SANTOS	Petróleo	Х		Х							х					Х				Х					Х		
BARROS (2006)	Petróleo	Х							Х							х									Х		
BOBBIO et al. (2006)	Multi processador	Х												Х		Х			Х								
CHEN (2003)	Petróleo	Х	Х								Х				Х								Х	Х			
CHEN et al. (2010)	Petróleo	Х	Х								х				х									х			
CHEN, MOAN (2004)	Petróleo	Х	Х								х				х									х			
DISTEFANO, PULIAFITO (2009)	Química									х					х										Х		
ELEYE-DATUBO et al. (2006)	Petróleo	Х	Х													Х						Х	Х	х			
FROHWEIN et al. (2010)	Transporte	Х									х				х											х	
GOOSSENS, COOKE (1997)	Petroquímica	Х					Х								Х			Х		Х							
HEIDERBER (1996)	Plantas Industriais												Х									Х			Х	Х	
JUN et al. (1999)	Falhas Críticas											Х	Х		Х					Х							

Tabela 4.6. Comparação entre diversas aplicações de análise de risco (Continuação)

AUTOR ÁREA APLICAÇÃO		IDENTIFICAÇÃO E MODELAGEM																										
	ÁREA APLICAÇÃO		IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA				IDENTIFICAÇÃO EVENTOS DE PERIGO				DA SEQUÊNCIA ACIDENTAL		ESTIMAÇÃO DA PROBABILIDAD							avaliação das consequências						TOMADA DE DECISÃO		
		Diagr Fluxo	Dados Histór		Matriz Depend	PHA	HAZOP	Análise Modos Falha	Barrera	Diag. Bloque	Diag. Sequ Event	Dados	Indepen	FTA	Depend	Redes Bayes	Simul- ação	M odelo fisico- quimico	Qualitat	ETA	Causa- Conseq	Custos	Criter Toler Risco	Qualitat	Markov	Árvore decisão		
KALANTAMIA et al. (2009)	Química	Х					Х	Х			Х				Х					Х	Х							
KAPLAN (1990)	Áero espacial	х									х				х					х								
MAHADEVAN et al. (2001)	Civil e Medicina	Х												Х		Х			Х					Х				
MEEL e SEIDER (2006)	Química							х			х				х													
MORTINELLI (2010)	Petróleo	Х	Х					х		х			х				Х		х									
MOURA, DROGUETT (2010)	Monitoração								Х						Х	Х	Х								Х			
PALACIOS et al. (2009)	Termo electricas			х				х					х									Х			Х	Х		
PATINO RODRIGUEZ (2012)	Petróleo			Х	Х	Х					Х			Х	Х		Х			Х	Х				Х	Х		
PERES CALIL (2005)	Química								Х					Х	х					Х								
ROED et al. (2009)	Petróleo	Х							Х					Х	Х	х				Х			Х					
STAMATELATOS (2002)	Petróleo			х	Х						Х			Х	Х					Х				Х				
TRUCCO et al. (2008)	Ná va l	Х	Х											Х		Х			Х									
WASH-1400 (1975)	Nuclear	Х										Х										Х						
YUN et al. (2009)	Petroquímica	Х				х						х		Х	х		Х		х	Х			Х					

No modelo proposto são aplicados os conceitos de análise de risco, usando técnicas de analise bayesiana e análise de Markov, com o objetivo de auxiliar à tomada de decisões no que se refere às mudanças na estratégia de operação, quando existe uma mudança repentina nas condições iniciais de operação. Este modelo visa reduzir a possibilidade de que ocorram incidentes que venham a afetar o desempenho ou causar acidentes que originem consequências de grandes magnitudes ou de alto risco, gerando um modelo matemático e uma medida quantitativa como suporte ao processo de tomada de decisão.

O modelo probabilístico proposto foi desenvolvido como um modelo híbrido para a tomada de decisão que incorpora a mudança de estado no decorrer da operação e avaliação probabilística dependente do estado de conhecimento, que são duas variáveis que não têm sido consideradas dentro de um mesmo modelo matemático que auxilie a tomada de decisão. O processo de tomada de decisão utiliza métodos estruturados e bem definidos, que permitem fazer este processo de forma objetiva e usando ferramentas que integram a análise bayesiana, bem como a possibilidade de que as condições de operação mudem ao longo do tempo de operação.

O método integra as vantagens qualitativas do FTA e "Diagrama Sequêncial de Eventos", com as vantagens quantitativas do cálculo das probabilidades através de um modelo matemático, incorporando resultados de simulação, conceitos de inferência bayesiana e processos Semi-Markovianos.

O modelo integra a inferência bayesiana, análise de Markov e teoria de decisão na quantificação probabilística do risco e sua aplicação como ferramenta na avaliação dinâmica do risco para apoiar a tomada de decisão. Embora sejam três métodos já existentes e utilizados em algumas aplicações, a integração e estruturação numérica aplicadas a sistemas complexos com resultados numéricos não foram encontrados na literatura, portanto este método constitui-se em uma solução viável para a tomada de decisão baseada em risco, quando existam mudanças nas condições de operação.

A modelagem proposta permite representar a dinâmica das interações, através de cenários de falha, e as relações de causa e efeito pertencentes ao contexto, possibilitando um melhor entendimento sobre a relevância dos fatores de desempenho nos operadores, permitindo assim a providência de medidas que atenuem suas consequências.

Dentre as vantagens da aplicação deste modelo pode-se citar a possibilidade de atualizar o sistema realizando inferências subjetivas e empíricas e representar probabilisticamente as mudanças de estados operacionais, bem como obter uma estimação probabilística do sistema em

86

relação às consequências devido ao fato que o sistema se encontra em um estado pré-determinado. Esta vantagem será apresentada no capítulo 5. O sistema complexo de segurança crítica selecionado para aplicar o modelo desenvolvido é a operação de *offloading* entre uma FPSO e um navio aliviador do tipo Suezmax.

# CAPÍTULO 5 APLICAÇÃO DO MODELO DE AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DINÂMICA NA OPERAÇÃO DE *OFFLOADING* EM SISTEMAS *OFFSHORE*

## **5.1.** CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Na atualidade, assim como no setor nuclear, a análise e avaliação de risco e segurança no setor marítimo são realizadas essencialmente por meio de regulamentos, regras, normas, entre outras, estabelecidos por diferentes organizações e instituições. Das regulamentações que estabelecem requisitos e padrões mínimos relativos à segurança dos navios e à prevenção da poluição marinha, as mais notórias são as convenções SOLAS e a MARPOL (PERES, 2009).

A importância de se analisar o risco envolvido em uma operação de *offloading* está em que as falhas podem causar acidentes com consequências de magnitudes consideráveis, que podem incluir lesões graves para as pessoas envolvidas e graves danos ao meio ambiente, além de atrasos na operação e descumprimento de contratos.

As estatísticas publicadas sobre os acidentes marítimos indicam que as operações marítimas na Europa oferecem um risco de 0,33 mortes/100 milhões pessoas-km, o que é quatro vezes maior do que as operações aéreas (TRUCCO *et al.*, 2008).

Autores como TSB (1995), Soares e Teixeira (2001), Ren *et al.* (2008), Gilbert, Ward e Wolford (2001) têm analisado os incidentes em navios que têm como consequência vazamentos, quando transportam petróleo e/ou seus derivados, apontando que, no início da década de 90, os pequenos vazamentos provenientes do transporte marítimo eram responsáveis por 98% das perdas totais de petróleo e derivados. Estudos realizados pela ITOPF (*International Tanker Owners Polution Federation*), entre 1974 a 1990 mostram que as principais causas dos vazamentos de óleo no mundo estavam relacionadas com as operações de carga e descarga (70,7%) e com as operações de abastecimento (12,5%). Os mesmos estudos, para o período de 1974 a 1998, informaram uma porcentagem diferente: 37% dos incidentes ocorreram nas operações de *offloading*, 20% em outras operações de rotina, 12% por problemas no casco do navio aliviador, 8% por encalhes, abastecimento ou colisões e 25% dos vazamentos são atribuídos a outras causas não especificadas. Analisando comparativamente os dados entre os dois períodos, considerando a capacidade do navio aliviador, pode-se perceber que a frequência dos incidentes vem se reduzindo

sensivelmente e que as operações de carga e descarga, assim como de abastecimento, são as principais causas dos vazamentos de pequeno e médio porte, enquanto que os encalhes e colisões são os responsáveis pelos incidentes de maior porte (CETESB, 2002).

Embora tenham sido feitos esforços para diminuir o número de falhas envolvendo as operações com navios aliviadores, a frequência de ocorrência destes acidentes e incidentes, especialmente com navios petroleiros, tem aumentado. Obviamente, o número de operações marítimas também tem aumentado, porém não deixa de ser importante analisar a natureza dos incidentes nestas operações, que podem estar associados com a complexidade das relações implícitas no projeto, procedimentos de operação, equipamentos, condições ambientais, entre outros (REN, 2008; TSB, 2005).

Planas, Vilchez e Casal (1999) realizaram uma análise das operações de carga e descarga de tanques estacionários usados em diversas atividades industriais.

A partir da análise da Figura 5.1, pode-se observar que vazamento é o acidente mais comum, representando 45% do total de incidentes analisados, seguido de incêndio com 23% e explosão, que aparece em terceiro lugar, sendo associada a 20% dos acidentes.

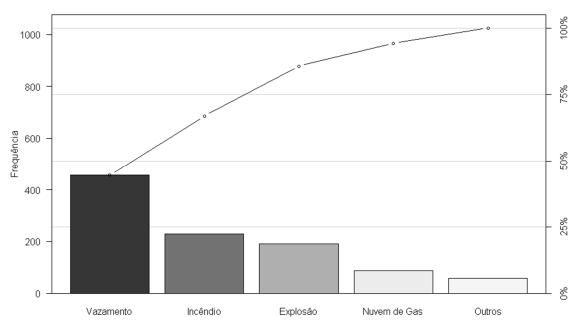


Figura 5.1 Tipo de Acidentes em Operações de Carga e Descarga de Tanques (PLANAS, VILCHEZ e CASAL 1999).

A Figura 5.2 apresenta a fonte de incidentes que causaram vazamento na operação de FPSOs no golfo de México no período compreendido entre o ano 1985 e o ano 2000 (GILBERT, WARD

e WOLFORD, 2001). Nela, observa-se que os incidentes nas operações com navios aliviadores são as operações que mais contribuíram com o total de vazamento ocorrido neste período.

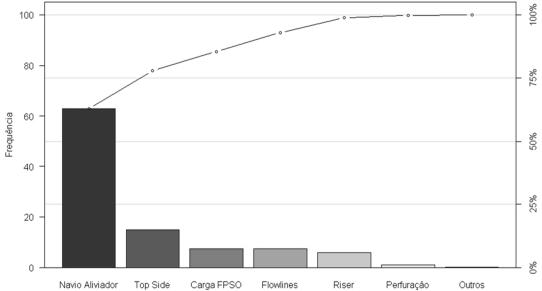


Figura 5.2 Fonte de Incidentes que Causaram Vazamento na Operação de FPSO (GILBERT, WARD e WOLFORD, 2001).

Quando analisadas as causas gerais deste tipo de acidente, conclui-se que as duas principais falhas são as mecânicas e as humanas. A primeira participa com 22% e a segunda corresponde a 21%. Outras causas são apresentadas na Tabela 5.1. Embora a análise feita por Planas, Vilchez e Casal (1999) seja para operações industriais com tanques estacionários, pode-se verificar que as causas dos incidentes e/ou acidentes em navios têm o mesmo comportamento (SOARES e TEIXEIRA, 2001; FERNANDEZ, 2010).

Tabela 5.1 Causas gerais de acidentes em carga e descarga de tanques (PLANAS, VILCHEZ e CASAL 1999).

Causa	<b>%</b>
Falha mecânica	22,0
Falha humana	20,7
Evento Externo	9,6
Reação no tanque	5,5
Impacto	2,8
Variação condições de operação	1,9
Falha na instrumentação	1,1
Desconhecida	0,3

Segundo Fernandez (2010), acidentes dos mais variados tipos já se tornaram comuns em plataformas de extração de petróleo, incluindo os que provocam imensos danos ambientais e financeiros, bem como lesões em operadores e, portanto, controles mais rigorosos podem ajudar a

evitar estes desastres (entre os acidentes mais recentes podem ser citados, os ocorridos na BP no golfo de México, ou na Chevron em Brasil).

Por outro lado, a perfuração de poços para exploração de petróleo no mar é uma operação que continua a ocorrer com grande frequência, atingindo profundidades cada vez maiores. Esta situação tem mostrado a necessidade de aperfeiçoar os sistemas de transferência e de transporte para um melhor rendimento do sistema de exploração.

No Brasil, no final de 2009, 92,5% do volume de reservas de petróleo estavam em bacias marítimas. Neste mesmo ano, do total de petróleo extraído no Brasil 53% da produção total era proveniente de ambiente marítimo com lâminas d'água de 400 a 1.000 m e 38% de poços localizados em profundidades de mais de 1.000 m, ou seja, mais de 90% de todas as reservas se encontram em águas profundas e ultraprofundas (ANP, 2010). Esta produção tem aumentado notavelmente nos últimos anos, como mostra a Figura 5.3.

Neste cenário, transportar os produtos extraídos em alto mar para instalações terrestres é um fator importante para estes tipos de operações. Deve-se entender que o transporte de petróleo e derivados é determinante no desempenho de outras operações, como o escoamento da produção dos campos petrolíferos e a distribuição dos produtos processados. Para viabilizar estas atividades, tem-se a integração de meios de transporte e instalações (GILBERT, WARD e WOLFORD, 2001). No caso do Brasil, esta integração é realizada pelos navios petroleiros que se constituíram no principal modal. Aproximadamente 82% da produção da Bacia de Campos é escoada através de navios aliviadores (REIS, 2004).

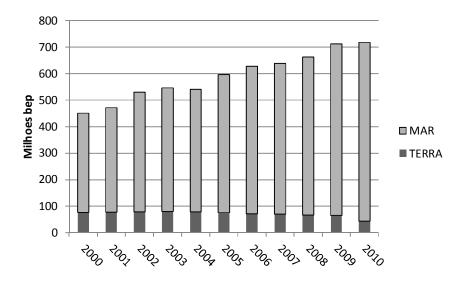


Figura 5.3 Produção anual de petróleo no Brasil terra e mar. Fonte: ANP.

Até a década de 1960, a exploração de petróleo em ambiente marítimo se baseava em sistemas flutuantes amarrados. Com o aumento da lâmina d'água, os sistemas passaram a necessitar de maiores e mais numerosas linhas de amarração, porém para profundidades maiores de 1000m, estes sistemas passaram a ser inviáveis economicamente, portanto foi necessário explorar outros meios de transporte para o petróleo extraído em alto mar (TANNURI, 2002). Posteriormente, foi empregada uma linha de fluxo e *risers* flexíveis até uma monobóia ancorada por um sistema de linhas de amarração em catenária (CALM do inglês *Catenary Anchor Leg Mooring*). Nesta época, o petróleo era enviado por monobóia SBS (do inglês *Single Buoy Storage*) para um navio aliviador amarrado a uma segunda monobóia (COOPETROLEO, 2004).

Na década de 90, com a evolução dos sistemas de exploração e das plataformas, iniciou-se a utilização de FPSO (do inglês *Floating Production, Storage and Offloading Systems*), que são navios de grande porte, com capacidade para produzir, processar e armazenar petróleo e gás natural. Nos conveses do FPSO foram instaladas plantas de processamento para separar e tratar os fluidos produzidos pelos poços. Depois de separado da água e do gás, o petróleo produzido é armazenado nos tanques do próprio navio e quando a capacidade de armazenagem é atingida, o petróleo é bombeado para os terminais por dutos submarinos ou por navios aliviadores (TANNURI, 2002). Apesar da existência destes dois meios de transporte, o uso de dutos para o bombeamento do petróleo dos poços até a costa é inviável devido a questões econômicas ou tecnológicas quando a distância entre o poço e a costa é grande, nestas situações, são usados navios aliviadores.

Assim, os sistemas amarrados são compostos por grandes massas flutuantes suportadas por linhas elásticas submetidas a forças ambientais, cenário propício para a ocorrência de grandes movimentos. Portanto, durante o bombeamento do petróleo para o navio aliviador, este deve ser mantido em posição segura em relação à plataforma para evitar uma colisão ou interrupção da transferência do petróleo por questões operacionais (MORATELLI, 2010).

Segundo Fernandez (2010), incidentes em águas profundas e ultraprofundas podem se transformar facilmente em acidentes que ameaçam a saúde e a vida dos trabalhadores ou, no mínimo, a operação. Este fato, bem como os acidentes ocorridos na área de extração de petróleo e gás em alto mar, como o acidente ocorrido no Golfo do México, em 2010, e o acidente com a plataforma P-36, em 2001, justificam ainda mais o desenvolvimento de avaliações de risco nesta área.

Diante do exposto, o sistema complexo de segurança crítica selecionado para aplicar o modelo desenvolvido é a operação de *offloading* entre um FPSO e um navio aliviador do tipo Suezmax. Esta operação se desenvolve na Bacia de Campos, no Brasil.

# **5.2.** IDENTIFICAÇÃO E MODELAGEM DOS CENÁRIOS DE PERIGO NA OPERAÇÃO DE *OFFLOADING*

O offloading é o processo de transferência de óleo cru do FPSO até um navio aliviador, que transportará o óleo cru até o local de estocagem definitivo. Esta transferência pode ser realizada de diversas formas, sendo uma das mais frequentes a conexão em tandem, especialmente quando a extração de petróleo e gás é realizada em águas profundas e ultraprofundas. A Figura 5.4 mostra este tipo de conexão.

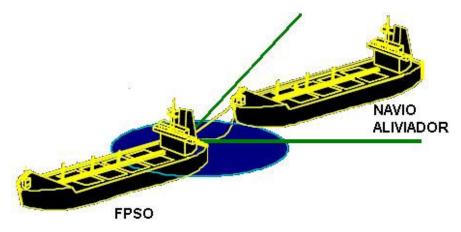


Figura 5.4 Esquema de conexão em Tandem (Adaptado de HALS, 1999).

Os navios aliviadores são embarcações projetadas, dimensionadas e construídas, ou alteradas e adaptadas, com o propósito de aliviar os tanques de armazenamento das plataformas de produção de petróleo. Os navios aliviadores possuem sistemas que lhes permitem se conectar em tandem com a plataforma e transferir o óleo de forma direta, porém só pode ser conectado em plataformas do tipo FSO ou FPSO. Quando a plataforma é de outro tipo, é preciso utilizar sistemas FSO como intermediários (HELGOY, 2003). Há basicamente oito tipos de navios aliviadores que se caracterizam pelo tamanho ou capacidade dos tanques de carga, conforme mostrado na Tabela 5.2.

Calado Carga Compr. Boca Tipo de navio (DWT) (metros) (metros) (metros) Small 5000 - 8000100-116 16-18 6,4-7,510000 - 25000124-170 19-25 8,0-9,6 Handysize 9,9-12,4 Handymax 30000 - 50000176-183 28 - 32Panamax 55.000 - 80.000228,6 32,2 12,1-14,1 244-250 Aframax 85.000 - 115.00042-44 12,1-15,0 125.000 - 165.000270-274 46-50 14,6-17,0 Suezmax VLCC (Very-large crude carriers) 260.000 - 319.000333 58-60 19,1-22,7 ULCC (Ultra-large crude carriers) 360.000 - 560.000341-460 65-70 23,1-24,7

Tabela 5.2 Tipos de navios aliviadores (MAN, 2009).

Na Figura 5.5, pode-se observar a distribuição de construção de cada tipo de navio aliviador considerando um período de 50 anos. Além disso, a linha decrescente mostra a porcentagem de navios aliviadores que ainda estão em operação, discriminados pela idade. Observa-se um crescimento da produção de navios aliviadores nos últimos cinco anos, destacando-se o aumento da produção de embarcações com maior capacidade de carga. Adicionalmente, pode-se observar que 40% dos navios aliviadores de mais de 25 anos ainda estão em operação.

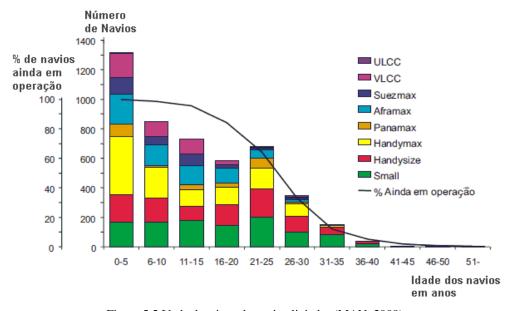


Figura 5.5 Idade dos tipos de navio aliviador (MAN, 2009).

Outro aspecto na caracterização dos navios aliviadores é o mecanismo que permite manter a posição relativa entre o navio aliviador e o FPSO. A posição pode ser mantida de duas formas: por meio de rebocadores ou por um sistema de posicionamento dinâmico (DP) (do Inglês

*Dynamic Positioning*), que mantém a embarcação em uma posição específica através do uso de propulsores comandados por computadores e usando informações de sensores de posição.

Os navios aliviadores que usam rebocadores para manter a posição são denominados navios convencionais. Estes só operam com MCP (Motor de Combustão Principal) e realizam o alívio com o auxílio de rebocadores que tracionam o navio aliviador visando manter a posição da embarcação em relação ao FPSO. O navio aliviador com DP integra quatro subsistemas: potência, controle, propulsão e sensoriamento (TANNURI, 2002).

É importante levar em consideração que é o sistema de posicionamento dinâmico que traz mais segurança e rapidez na manobra de aproximação e amarração às plataformas (TJALLEMA, et al., 2007). A Figura 5.6 apresenta quatro das configurações mais comuns da propulsão de navios aliviadores, sendo que o primeiro corresponde ao navio convencional, e os outros três correspondem aos sistemas DP.

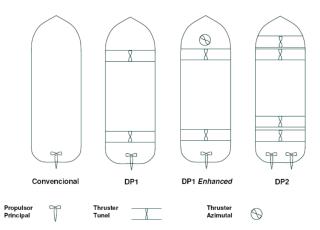


Figura 5.6 Tipos de sistemas de posicionamento em navio aliviadores (CORREA et al., 2006).

O sistema DP influencia diretamente na segurança e eficiência operacional do navio aliviador, já que um FPSO é, essencialmente, uma planta de produção com forte presença de combustível e gás e um choque entre o navio aliviador e a plataforma pode causar um acidente de graves consequências (HSE, 1999). A Figura 5.7 mostra a porcentagem das falhas que, entre 1994 e 2004, originaram a perda de posição em navios petroleiros. Pode-se observar que a maioria dos incidentes são causados por problemas nos sensores encarregados de dar a referência de posição e nos *thursters*, seguido de erros humanos. Porém, quando são analisadas as causas que provocaram algum tipo de incidente ou acidente compreendido no período de 2001 e 2004, observa-se que a porcentagem de erros humanos diminuiu notavelmente no período compreendido entre os anos 1994 e 2001; a segunda causa de perda de posição é falha nos propulsores, seguida de falha no sistema de comando do DP.

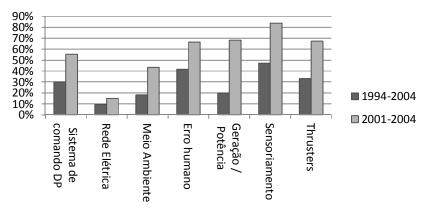


Figura 5.7 Incidentes de Perda de Posição entre 1994-2004 (TJALLEMA et al., 2007) e 2001-2004 (MORATELLI, 2010)

A Figura 5.8 analisa a gravidade do incidente que causou a perda de posição. Verifica-se que a principal causa de incidente de grande magnitude (acidente) é a falha dos sensores e dos *thrusters*, e que os erros humanos aparecem como principal causa em incidentes de menor magnitude.

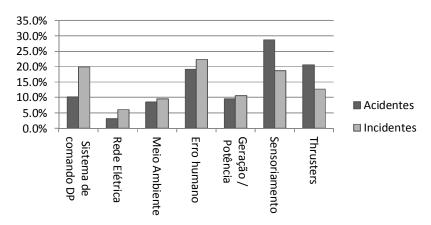


Figura 5.8 Causas de Perda de Posição entre 1994-2004 que causaram Incidentes e Acidentes (TJALLEMA *et al.*, 2007)

Independentemente do tipo de navio aliviador (DP ou convencional) que seja usado no offloading, o processo de offloading, do ponto de vista do navio aliviador, é composto por cinco etapas: 1) Aproximação; 2) Conexão; 3) Transferência; 4) Desconexão; e 5) Afastamento. No contexto desta pesquisa, será analisada a operação de offloading entre um FPSO e um navio aliviador do tipo Suezmax DP. A seguir, são explicadas as principais características de cada uma das etapas de uma operação de offloading (MCGA, 2005).

O processo começa com a etapa de aproximação, a qual se inicia quando o navio aliviador está a uma distância de 1500 metros do FPSO e a uma velocidade máxima de 1,5 nós. Neste

ponto, deve-se observar a deriva do navio aliviador e determinar se a condição para realizar o *offloading* é normal ou não.

Na sequência do processo, o FPSO lança o sistema de amarração, iniciando-se, assim, a segunda etapa. Efetua-se o lançamento do sistema de amarração com o auxílio de uma lancha, quando o navio aliviador está a uma distância aproximada de 1000 metros e com velocidade máxima de 1,5 nós. Posteriormente, quando a distância entre o FPSO e o navio aliviador é de 150 metros, é conectado o cabo "mensageiro" do FPSO ao do navio aliviador. Assim, o navio aliviador inicia o recolhimento dos cabos mensageiros e do conjunto de amarração. O navio aliviador se posiciona a uma distância na qual será realizado o *offloading* e, em seguida, o sistema de amarração é posicionado e travado no mordente da FPSO para então ser iniciada a conexão do mangote em um procedimento similar ao do sistema de amarração.

Após a conexão do mangote, o sistema está pronto para abrir as válvulas e começar a etapa de transferência.

A linha de transferência deverá ser pressurizada antes do início da operação de transferência. A válvula de transferência deve permanecer aberta e a válvula coletora do navio aliviador fechada para que a pressão seja mantida sobre a linha de transferência. Quando o processo está começando ou terminando, as válvulas devem estar reguladas para se ter uma vazão baixa. No final da etapa de transferência, é importante ter baixa vazão, para evitar o transbordamento do tanque.

Após o término da transferência de óleo cru do FPSO para o navio aliviador, inicia-se a etapa de desconexão e desamarração incluindo a desconexão e envio do mangote, do sistema de amarração e dos cabos mensageiros. Finalmente, o navio aliviador realiza a operação de afastamento do FPSO.

Após definir a sequência do processo de *offloading*, estudar as informações, rotinas e procedimentos associados a este processo, é realizada a análise funcional do sistema.

A árvore funcional para a operação de *offloading* inicialmente está dividida nos cinco estágios da operação, portanto cada estágio é entendido como o primeiro nível de sistemas necessários para que a operação de *offloading* seja realizada com sucesso. Em seguida, cada um destes sistemas é subdivido nos subsistemas que suportam a sua funcionalidade, como mostra a Figura 5.9.

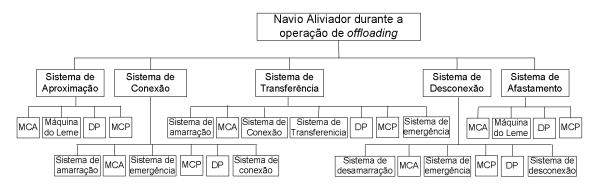


Figura 5.9 Árvore Funcional Geral do Processo de Offloading.

O diagrama funcional geral é subdivido em grandes subsistemas até chegar aos componentes básicos do sistema. Assim, para cada um dos ramos da árvore geral, foi desenvolvida a análise funcional correspondente.

Desta forma, define-se a função principal de cada subsistema e elabora-se a árvore funcional correspondente, usando as descrições operacionais e funcionais, como a apresentada no Apêndice A, para o MCP. No caso do MCP, cuja árvore funcional é apresentada na Figura 5.10, a função principal é transformar a energia química do combustível em energia mecânica. Para cumprir esta função, o sistema precisa de oito subsistemas básicos: resfriamento ou sistema de arrefecimento, alimentação de combustível, partida, admissão de ar, exaustão, lubrificação, combustão e sistema de controle (TAYLOR, 2007). A interação e o correto funcionamento destes oito subsistemas faz com que o MCP possa desempenhar sua função principal, ou seja, a falha em um destes subsistemas pode paralisar o MCP, tendo como consequência principal deixar o navio aliviador sem propulsão.

A análise de cada uma das etapas da operação de *offloading*, com o auxílio de especialistas na execução desta operação, resultou em 56 eventos de perigo para navios DP, como mostra o Apêndice B. A distribuição dos eventos para navios DP em cada uma das cinco etapas consideradas é apresentada na Tabela 5.3.

Etapa offloading	Tolerável	Médio	Não Tolerável	Total
Aproximação	4,17%	4,17%	8,33%	16,67%
Conexão	6,25%	8,33%	8,33%	22,92%
Transferência	0,00%	20,83%	8,33%	29,17%
Desconexão	4,17%	2,08%	12,50%	18,75%
Afastamento	0,00%	4,17%	8,33%	12,50%
Total	14,58%	39,58%	45,83%	100,00%

Tabela 5.3 Resumo dos eventos de perigo classificados por fase.

Do total de eventos considerados na análise, 46% dos mesmos foram classificados com risco alto, 40% dos eventos aparecem com risco médio e em menor proporção (15%) aparecem os eventos com risco baixo.

A etapa de transferência tem outras características, como ser a etapa com maior número de eventos de perigo e todos os eventos têm risco médio ou alto. Não obstante, é a única onde os eventos com risco médio têm uma maior proporção que os eventos com risco alto. Dentre as etapas analisadas, a etapa de conexão apresenta a maior proporção de eventos com risco alto.

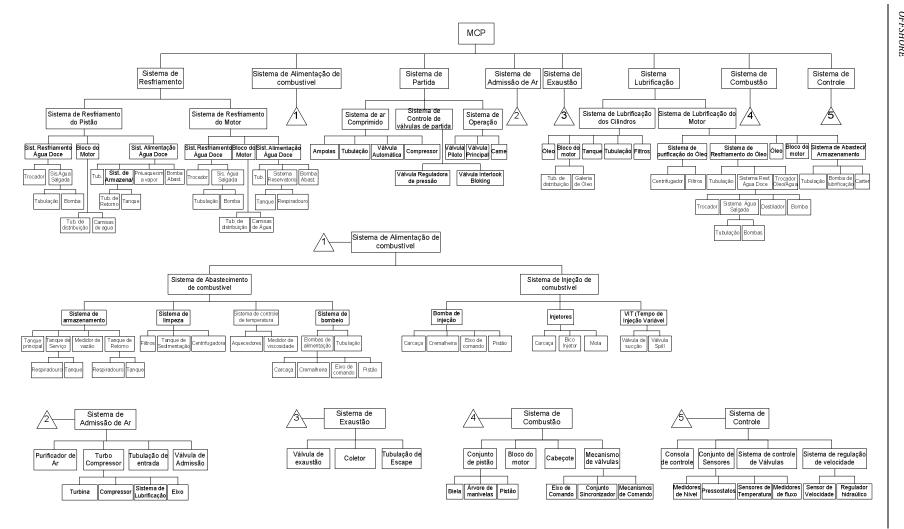


Figura 5.10 Árvore Funcional do Motor de Combustão Propulsão

A informação da análise funcional serve de entrada para realizar o passo seguinte da metodologia que é a elaboração da análise preliminar de perigos. Na Tabela 5.4 é apresentada, como exemplo, a análise preliminar dos perigos realizada para os eventos de perigo na fase de conexão, sendo que a análise completa é apresentada no Apêndice B.

Tabela 5.4 Exemplo de Análise Preliminar de Perigos para alguns componentes da operação de offloading.

			CAUSA		CONSEQUÊNCIA			CLASSIFICAÇÃO DO RISCO							
FASE	EVENTO DE PERIGO	DESCRIÇÃO DE EVENTO	DESCRIÇ ÃO DA CAUSA	FREQUÊNCIA	AÇÃO DE MITIGAÇÃO	LOCAL (aliviador)	OPER. OFFLOAD.	AÇÃO DE CONTING.	SEG. PESSOAL	EQUIPAMENTO	AMBIENTAL	SEG. PESSOAL	EQUIPAMENTO	AMBIENTAL	OPERAÇÃO OFFLOADING
	FALHA SISTEMA DE POSICIONA. DINÂMICO	PERDA DA POSIÇÃO	Problema thruster Falha na manutenção Problemas na geração Problema Satélite GPS	D	Utilizar rotinas de manutenção rígidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades) Utilização de rotinas de manutenção dos geradores Verificar avisos ao navegantes sobre informações de satélites	Incapacidad e de manutenção	com impacto médio, seguido de incêndio	Abortar operação  Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção utilizando o MCP	Ш	ш	Ш	N T	N T	N T	NÃO TOLERÁVEL
T R A N S F E R Ê N C I I A	FALHA M.C.P. DO ALIVIADOR	PARADA DO MOTOR COMBUSTÃO	Falha Bomba injetora Falha no Cilindro		Utilizar rotinas de manutenção rígidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	Incapacidad e de manutenção da posição do aliviador para a realização do	possibilidade de colisão se o problema persistir Possibilidade de colisão com impacto médio,	procedimento de afastamento do aliviador em	Ш	Ш	Ш	M	M	М	MÉDIO
	FALHA M.C.A. DO	PARADA DO SISTEMA DIESEL- GERADOR	Falha na manutenção	D	Utilizar rotinas de manutenção rígidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	Falha bombas hidráulicas	de colisão com impacto médio, seguido de incêndio	Abortar operação de aproximação e solicitar o rebocador para afastar o aliviador das proximidades da unidade de produção	Ш	III	Ш	N T	N T	N T	NÃO TOLERÁVEL
	EXECUÇAO DE MANOBRAS ARRISCADAS	CCIAL. P/ EVITAR	Falha da programaçã o em programar o navio.	Е	Programar o navio com antecedência de 48 h antes do início da operação de offloading	Sobrecarga no MCP e no DP	Possibilidade de colisão com impacto alto, seguida de incêndio em condição ambiental desfavorável	Solicitar auxílio de rebocador	IV	IVI	IV	N T	N T	N T	NÃO TOLERÁVEL

Os eventos de perigo considerados críticos nas cinco etapas do processo de *offloading* são: 1) Falha do Motor de Combustão Auxiliar (MCA); 2) Mudança de Condições Ambientais; 3) Execução de Manobras Arriscadas, 4) Falha no Posicionamento Dinâmico (DP); 5) Falha do Motor de Combustão Principal (MCP).

A falha do Motor de Combustão Auxiliar (MCA) do navio aliviador é considerada como geradora de um alto risco. A perda do MCA acarreta no não fornecimento de energia elétrica para vários sistemas do navio aliviador, incluindo as bombas de óleo lubrificante do Motor de Combustão Principal (MCP), implicando no desligamento do mesmo, bem como dos sistemas de navegação e manobra, entre outros.

A falha do MCA pode ser causada por falhas nas ações de manutenção do grupo motogerador, por falhas no sistema de lubrificação ou mesmo pela ocorrência de falhas inesperadas, associadas ao próprio desgaste natural dos componentes deste equipamento. Pode-se minimizar a frequência de ocorrência deste evento através da execução de um rígido controle das ações de manutenção periódicas (ações preventivas). Dada a ocorrência da falha do MCA, recomenda-se, como ação de contingência, abortar a operação de *offloading*, através de procedimentos de emergência, executando-se o afastamento do navio aliviador.

Outro evento crítico encontrado corresponde à falha no DP. Esta pode ser causada por problemas no sistema de geração de energia do DP, por falha nos propulsores (*thrusters*), ou mesmo por falha no sistema de navegação e controle. Como forma de reduzir a possibilidade de ocorrência deste evento recomenda-se a utilização de procedimentos de manutenção preventiva, bastante detalhados. Como medida de contingência, em caso de ocorrência de uma falha, recomenda-se abortar o processo de *offloading* e executar o afastamento do navio aliviador com o auxílio do motor de combustão principal.

Por outro lado, as mudanças das condições ambientais podem ocorrer ao longo do processo de offloading e correspondem a um processo de alteração nas condições de vento e ondas. Este evento pode ocorrer em função de erros nas previsões meteorológicas ou devido a mudanças inesperadas nas condições climáticas. Uma forma de reduzir a frequência de ocorrência deste evento está associada com uma verificação detalhada da previsão do clima para o período de offloading, antes do navio aliviador adentrar na área de operação. Neste ponto, torna-se fundamental possuir ferramentas que auxiliem a tomada decisão sobre a interrupção da operação.

Neste mesmo contexto, a execução de manobras arriscadas corresponde a problemas associados com a execução das manobras do navio aliviador ao longo da operação de *offloading*.

Tal evento pode ser ocasionado por erros de programação no sistema automático do navio aliviador ou mesmo erros de julgamento sobre as condições de manobrabilidade do navio aliviador. A ação de mitigação recomendada envolve a solicitação de auxílio a um rebocador para corrigir o posicionamento do aliviador (UKOOA, 2001).

Outras falhas encontradas através da análise preliminar de perigos, em etapas específicas da operação de *offloading*, são: na fase de transferência, o vazamento de óleo dos tanques, devido às manobras erradas com as válvulas, que é um evento de perigo. Uma vez ocorrido o vazamento, além dos danos ambientais, pode haver incêndio, causando graves danos aos seres humanos e aos navios; na fase de desconexão/desamarração, podem ocorrer falhas humanas no processo de liberação do cabo mensageiro do mangote e do sistema de amarração. Estas falhas humanas causam a queda destes elementos no mar, exigindo embarcação de apoio para recolhê-los, além de poder causar um acidente com vítimas, já que o cabo mensageiro do sistema de amarração pode arremessar os operadores ou causar ferimentos quando são tensionados.

Diante do exposto, embora a conexão em tandem seja frequente nas operações de alívio em alto mar, considera-se a mesma uma operação complexa e difícil de ser executada. Além dos eventos de perigo anteriormente citados, existe outro fator de risco que é a posição relativa entre o FPSO e o navio aliviador, durante a operação de *offloading*. Após a amarração e como consequência da ação das condições ambientais, o navio aliviador pode se movimentar em todo o raio da amarração. Desta forma, podem ser identificados três setores operacionais que o navio aliviador pode atingir, verde, amarelo e vermelho (UKOOA, 2001; MORATELLI, 2010). Em relação aos limites operacionais, operadores brasileiros determinam o posicionamento relativo entre o FPSO e o navio aliviador como apresentado na Figura 5.11.

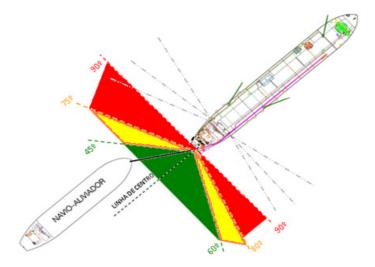


Figura 5.11 Setores e limites de operação (TANNURI, MORISHITA, et al. 2009).

O setor verde corresponde ao setor no qual o navio aliviador pode mover-se livremente e a condição operacional de *offloading* é considerada normal. Os limites para operação normal são 45/60 graus de aproamento relativo da linha do centro.

O setor amarelo corresponde àquele no qual o navio aliviador pode permanecer um intervalo de tempo suficiente para realizar as manobras necessárias para fazer o navio voltar para o setor de operação normal. Caso isto não seja possível e o ângulo continue aumentado, a operação de *offloading* será interrompida de imediato quando a posição atingir os 75/80 graus, chegando ao setor vermelho, onde o navio aliviador deve ser desconectado e a operação de *offloading* abortada.

Após a definição dos efeitos que os eventos de perigo teriam sobre o sistema em cada etapa da operação de *offloading*, e a forma como seriam afetados o navio aliviador e a própria operação de *offloading*, pode-se concluir que as consequências associadas a uma condição ambiental inadequada são agravadas quando o navio aliviador perde a capacidade de manter sua posição. Neste sentido, decidiu-se que o evento iniciador é "Condições ambientais desfavoráveis" e serão analisados os possíveis cenários de falha que conduzem a uma perda de capacidade do navio aliviador de manter sua posição. Neste ponto, a tripulação deverá tomar decisões em função do cenário que esteja ocorrendo nesse momento.

A partir do evento iniciador (condições ambientais desfavoráveis) e conforme com os resultados da árvore funcional e da PHA, foram selecionados três eventos de perigo que se relacionam em uma sequência acidental de interesse e determinou-se que os diferentes cenários de risco geram as categorias de consequências apresentadas na Figura 5.12.

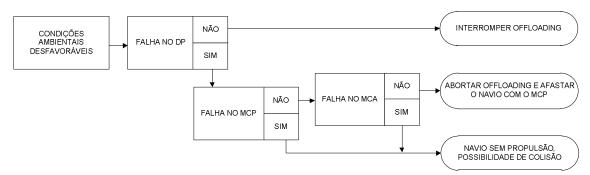


Figura 5.12 Diagrama Sequêncial de Eventos.

No primeiro caso, o navio aliviador sai da zona normal de operação e, portanto, a operação de *offloading* deve ser interrompida e as bombas desligadas até que as condições ambientais permitam continuar a transferência. Neste cenário o navio aliviador não tem sua capacidade de manter a posição comprometida por uma condição própria e sim pelas condições ambientais. Se acontecer uma falha no sistema DP, a operação de *offloading* deverá ser abortada, o que

significa cancelar a operação de *offloading*, devido a uma condição que coloca o navio aliviador em uma situação no qual este não pode mais manter a sua posição em relação ao FPSO e, neste caso, o navio aliviador deve ser afastado do FPSO com a ajuda do MCP. No caso em que o navio aliviador se encontre sem propulsão pela falha do DP e do MCP ou MCA, o navio aliviador fica à deriva sem propulsão, existindo a possibilidade de uma colisão com o FPSO.

# 5.3. AVALIAÇÃO DE PROBABILIDADE PARA OS CENÁRIOS DE RISCO NA OPERAÇÃO DE *OFFLOADING*

A partir da sequência acidental estabelecida na etapa anterior, estima-se a probabilidade de que um determinado cenário de risco ocorra, usando a análise causa-consequência. Na Figura 5.13 é apresentada a árvore de eventos, para a operação de *offloading*, que corresponde à etapa inicial desta análise.

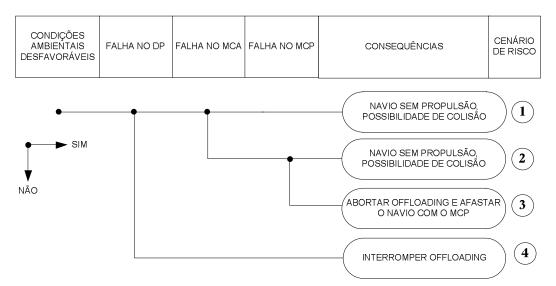


Figura 5.13 Árvore de eventos para a operação de offloading.

A probabilidade de cada um dos eventos de perigo que aparecem na sequência acidental pode ser calculada através da análise por árvores de falha. Da Figura 5.14 à Figura 5.16 são apresentadas as árvores de falha para cada evento de perigo, onde cada evento topo corresponde aos eventos de perigo da sequência acidental.

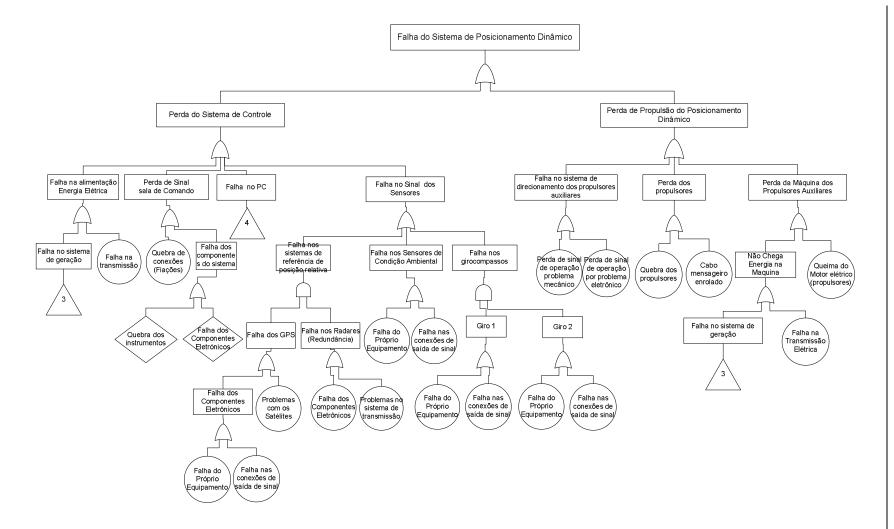


Figura 5.14 Árvore de Falhas para o Sistema Posicionamento Dinâmico

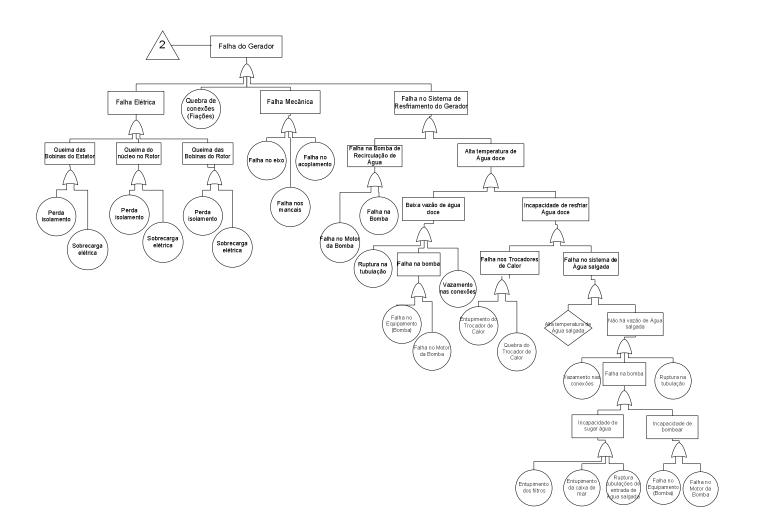


Figura 5.15 Árvore de Falhas para o MCA

107

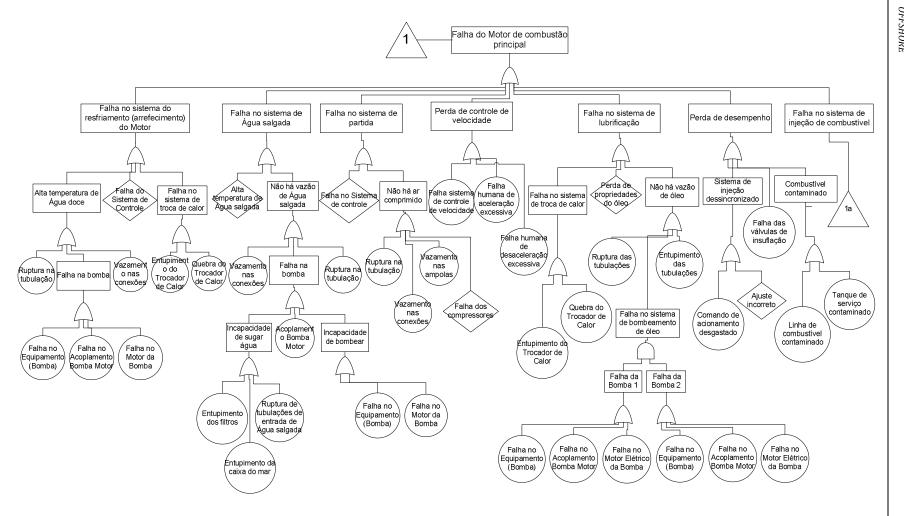


Figura 5.16 Árvore de Falhas para o MCP (Contínua)

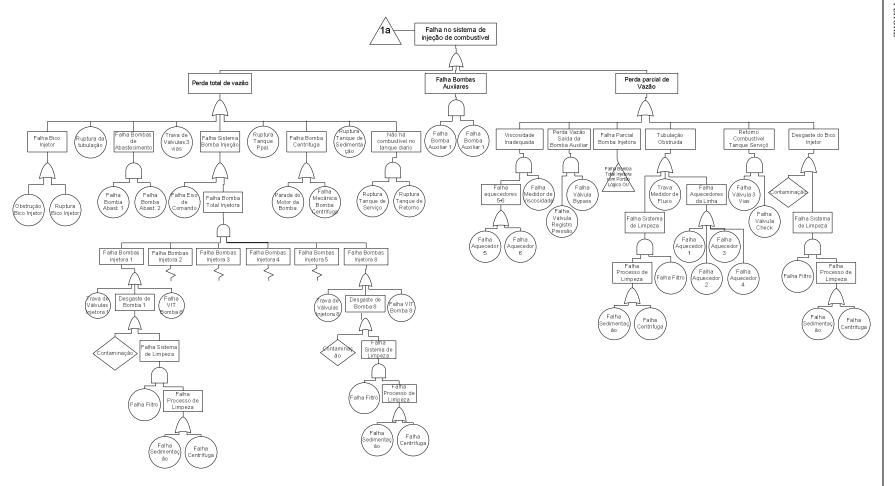


Figura 5.16 Árvore de Falhas para o MCP (Fim)

Para estimar a probabilidade dos eventos de perigo é usada a informação, sobre a taxa média de falha, disponível em bases de dados (NPRD, 1995; LEE, 1996; SMITH, 2000; OREDA, 2002) e publicações com estatísticas de falha para os diversos sistemas de navios aliviadores (GRAY e MACDONALD, 1982; GILBERT, WARD e WOLFORD, 2001; CHEN e MOAN, 2004; TSB, 2011). Posteriormente, são selecionadas apropriadas funções *a priori* e de verossimilhança (ver Tabela 4.1), como é ilustrado a seguir. Cabe ressaltar que a análise aqui realizada é uma análise para dados homogêneos embora os dados sejam intrinsecamente não homogêneos.

Nas bases de dados, encontra-se disponível a taxa média de falha ( $\lambda$ ) e o desvio padrão desta taxa. Desta forma, com estes dois parâmetros e usando a eq. (5.1) é possível encontrar os parâmetros da distribuição Gama,  $\alpha$  e  $\beta$ .

$$E[\lambda] = \frac{\alpha}{\beta} \qquad \sigma[\lambda] = \frac{\sqrt{\alpha}}{\beta} \tag{5.1}$$

A distribuição conjugada para a distribuição Gama é a distribuição de Poisson. Assim, resulta apropriado que a atualização da distribuição de falhas seja expressa em termos do número de falhas (**r**) esperadas num tempo **t**. Comumente em confiabilidade, é medido o tempo de operação até a primeira falha (**t**, **r=1**). Portanto, a probabilidade de falha *a posteriori* apresentada na eq. (5.2) poderá ser calculada usando a distribuição Gama com parâmetros atualizados.

$$P(\lambda|E) = \frac{\left[\frac{(\lambda \cdot t)^r}{r!} \cdot e^{-\lambda \cdot t}\right] \cdot \left[\frac{\beta^{\alpha} \cdot \lambda^{\alpha - 1}}{\Gamma(\alpha)} \cdot e^{-\beta \cdot \lambda}\right]}{\int_0^{\infty} \left[\frac{(\lambda \cdot t)^r}{r!} \cdot e^{-\lambda \cdot t}\right] \cdot \left[\frac{\beta^{\alpha} \cdot \lambda^{\alpha - 1}}{\Gamma(\alpha)} \cdot e^{-\beta \cdot \lambda}\right] \cdot d\lambda} \Rightarrow P(\lambda|E) = \left[\frac{(\beta + t)^{\alpha + r} \cdot \lambda^{\alpha + r - 1}}{\Gamma(\alpha + r)}\right] \cdot e^{-(\beta + t) \cdot \lambda}$$
(5.2)

A eq. (5.2) pode ser empregada tanto para os eventos básicos quanto para os eventos topo. A seguir, é ilustrado o procedimento para os eventos básicos, usando como exemplo a bomba centrífuga do sistema de abastecimento de combustível do MCP, cuja árvore de falha é apresentada na Figura 5.17.

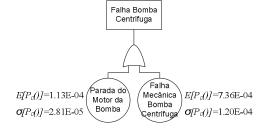


Figura 5.17 Árvore de falha para Bomba Centrífuga do Sistema de Abastecimento de Combustível

As taxas de falha,  $E[P_{\theta}(\bullet)]$ , e o desvio padrão,  $\sigma[P_{\theta}(\bullet)]$ , para os eventos básicos foram selecionados das bases de dados NPRD (1995), LEE (1996), SMITH (2000) e OREDA, (2002). Com estes dados e usando a eq. (5.1), os parâmetros da distribuição Gama podem ser calculados como é mostrado a seguir:

$$1.13 \cdot 10^{-4} = \frac{\alpha_{Motor}}{\beta_{Motor}} \quad 7.36 \cdot 10^{-4} = \frac{\alpha_{Falha \, mec}}{\beta_{Falha \, mec}}$$

$$2.81 \cdot 10^{-5} = \frac{\sqrt{\alpha_{Motor}}}{\beta_{Motor}} \quad 1.20 \cdot 10^{-4} = \frac{\sqrt{\alpha_{Falha \, mec}}}{\beta_{Falha \, mec}}$$

$$\alpha_{Motor} = 1.62 \cdot 10^{1}; \ \beta_{Motor} = 1.43 \cdot 10^{5} \ \alpha_{Falha \, mec} = 3.76 \cdot 10^{1}; \ \beta_{Falha \, mec} = 5.11 \cdot 10^{4}$$

A partir destes dados, calcula-se a distribuição *a posteriori*,  $P(\lambda | E)$ , para os eventos básicos, como é mostrado na Figura 5.18. Neste caso, assumiu-se a situação mais crítica para o navio aliviador, que é um tempo de cinco anos (t=43800 h), tempo médio em que os navios aliviadores são submetidos a manutenção de tipo *overhaul* (J. SOUZA, 2011).

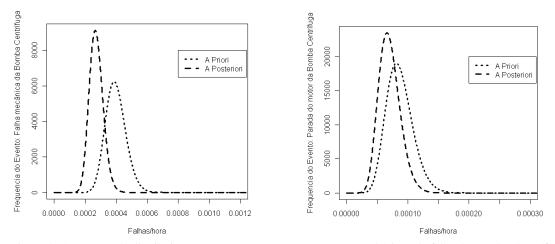


Figura 5.18 Funções da distribuição A priori e A posteriori para eventos básicos da falha da Bomba Centrífuga

Na Figura 5.18 pode-se observar a influência que tem a evidência sobre a distribuição *a priori* dos eventos básicos.

A probabilidade acumulada destas distribuições corresponde à probabilidade de que o sistema opere sem falhas em um tempo acumulado, ou seja, o tempo que o sistema leva operando sem receber manutenção completa. Neste caso, para um tempo de 43800 horas, a probabilidade *a posteriori* para cada evento básico da árvore da Figura 5.17 é mostrada na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 Probabilidade A Posteriori dos Eventos Básicos para a Falha na Bomba Centrífuga

Evento	Probabilidade
Parada do Motor da Bomba Centrífuga	0,00002013186
Falha Mecânica da Bomba Centrífuga	0,0001268729

Finalmente, a probabilidade do evento topo acontecer é calculada resolvendo a árvore, assumindo independência entre os básicos. Assim, a probabilidade de ter uma falha na bomba centrífuga em um tempo de 43800 horas é: 2.554187e-09.

Após calcular a probabilidade a *posteriori* de cada evento de perigo, pode-se a calcular a probabilidade de que o sistema falhe durante a operação de *offloading*, tendo em vista que o sistema operou sem falhas até esse momento. Assim, assumindo que o intervalo entre as atividades de manutenção preventiva de grande porte é de cinco anos e que a operação de *offloading* demora 24 horas, esta probabilidade, **h**, pode ser expressa de acordo com a eq. (5.3):

$$h = \frac{P(43800 \le t \le 43824)}{P(t > 43800)} \tag{5.3}$$

Pode-se verificar que o denominador da eq. (5.3) corresponde à confiabilidade do sistema analisado no tempo de 43800 horas, sendo que cada sistema está associado a um evento de perigo da Figura 5.13.

A Tabela 5.6 mostra a probabilidade de que cada um dos sistemas falhe durante a operação de *offloading*, dado que este operou sem falhas até 43800 horas. Pode-se observar que, neste caso, o evento mais provável de acontecer durante o *offloading* é a Falha do MCA.

Tabela 5.6 Probabilidade de um Evento de Perigo.

Evento de Perigo	P(43800 <t<43824)< th=""><th>Confiabilidade t=43800</th><th>Probabilidade que o sistema falhe durante Offloading dado que não falhou ate agora</th></t<43824)<>	Confiabilidade t=43800	Probabilidade que o sistema falhe durante Offloading dado que não falhou ate agora
Falha Sistema DP *	1,795E-04	5,01E-01	3,58E-04
Falha no MCA *	8,352E-07	1,77E-04	4,71E-03
Falha no MCP **	1,164E-05	9,79E-01	1,19E-05

<sup>\*</sup>Obtido das referências (OREDA; 2002) e (GRAY e MACDONALD, 1982)

Após obter a probabilidade de ocorrência, de cada evento de perigo, durante o *offloading*, e assumindo que estes eventos são independentes, a probabilidade de cada um dos cenários de falhas apresentados na Figura 5.13 é calculada e os resultados são apresentados na Tabela 5.7.

<sup>\*\*</sup>Calculado no Apêndice C

 Cenário de Risco
 Probabilidade de Cenário acontecer

 1
 1,687E-06

 2
 4,261E-09

 3
 3,581E-04

 4
 9,996E-01

Tabela 5.7 Probabilidade do Cenário de Risco Acontecer Durante a Operação de Offloading.

# 5.4. AVALIAÇÃO DAS CONSEQUÊNCIAS NA OPERAÇÃO DE OFFLOADING

A Tabela 5.8 mostra a probabilidade de que uma consequência aconteça durante a operação de *offloading*, dado que este operou sem falhas até 43800 horas.

Tabela 5.8 Probabilidade de uma consequência acontecer.

Consequência	Probabilidade de uma consequência
A: Interrupção do offloading	9,996E-01
B: Abortar offloading e afastar com o MCP	3,581E-04
C: Navio aliviador sem propulsão	1,691E-06

Dos resultados apresentados, pode-se verificar que para as condições analisadas, a pior consequência tem pouca chance de acontecer (1,691E-06). Porém, até o presente momento, estas consequências tem sido analisadas de forma independente das condições ambientais e como é sabido existem condições ambientais mais desfavoráveis, que podem ter uma chance maior de levar a operação de *offloading* a condições operacionais indesejadas. Levando isto em consideração, a etapa de decisão considera diversas condições ambientais e a chance que tem o navio aliviador de se encontrar em uma condição operacional indesejada.

### 5.5. ANÁLISE DE DECISÃO

Até o momento foram definidas e avaliadas as consequências que um evento iniciador pode causar. Porém, neste caso, as condições iniciais não são fixas, já que podem mudar no decorrer da operação. Portanto, devem ser definidos critérios que permitam avaliar o que é considerado como uma condição ambiental desfavorável, para, assim, tomar a decisão de mudar ou não a estratégia de operação. Neste caso, uma condição ambiental desfavorável será

definida em função da chance que a condição ambiental tenha de mudar as condições de operação.

Para estabelecer estes critérios, consideram-se três estágios: inicialmente definem-se as condições operacionais consideradas inaceitáveis e analisa-se a chance que o sistema tem de mudar de um estado de operação aceitável para outro inaceitável. Posteriormente, analisa-se a probabilidade que existe de que uma determinada consequência ocorra devido ao fato de que o sistema mudou de estado e, finalmente, com esta informação e usando a árvore de decisão, determina-se se para as condições específicas deve-se ou não manter a estratégia de operação.

### 5.5.1. Análise de Mudança de Estado

### 5.5.1.1. Estados do Sistema

Os estados definidos para a operação de *offloading* são dois:

- Estado 1 S<sub>1</sub>: O navio aliviador encontra-se na zona de operação normal (zona verde),
- Estado 2 S<sub>2</sub>: O navio aliviador encontra-se fora da zona de operação normal

Levando em consideração os estados e o exposto na seção anterior, considera-se um estado de operação inaceitável quando o navio aliviador sai da zona de operação normal, uma vez que se o navio aliviador não tem capacidade de retornar rapidamente para a zona de operação normal, a operação deverá ser interrompida e poderá ser, inclusive, abortada.

Neste caso, foi definida como variável de interesse o ângulo entre o FPSO e o navio aliviador, já que o ângulo é a referência para definir o limite entre as zonas de operação e assim, a mudança de estado ocorre quando este ângulo é maior que 45°. Embora no caso específico do Brasil os ângulos sejam diferentes a cada lado da linha central do aliviador, em trabalhos específicos de operação *Offloading* no Brasil, como em Moratelli (2010), são realizadas as análises supondo simetria nos dois lados da linha central, e neste caso também será considerada esta hipótese, porém dado que se está estabelecendo uma menor área de operação normal, com esta hipótese, está-se aumentando a segurança da operação.

A Figura 5.19 mostra o diagrama de estados para o problema específico, onde se tem dois estados e existem taxas de transferência entre estados que dependem do tempo. Pode-se verificar que este caracteriza um processo semi-markoviano.

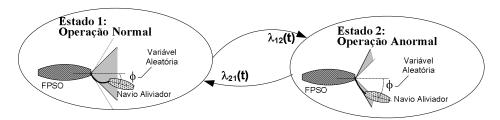


Figura 5.19 Definição do Estados e Variável Aleatória

#### 5.5.1.2. *Obtenção de dados*

Após a definição dos estados do sistema e da variável aleatória, é preciso coletar os dados. Neste caso, os dados provêm do TPN (Simulador do Tanque Provas Numérico) que é um simulador que reproduz os movimentos do navio aliviador e do FPSO para condições específicas de operação e de meio ambiente (TANNURI, et al., 2009).

O simulador permite conhecer, durante todo o tempo de simulação, a posição do navio aliviador e do FPSO em um sistema de coordenadas fixas localizadas no centro do FPSO e no extremo de amarração do navio aliviador. Portanto, fazendo uma translação de eixos e passando estes dados para coordenadas polares, é possível conhecer o ângulo e o raio entre o FPSO e o navio aliviador em cada instante da simulação.

As simulações foram realizadas considerando um navio aliviador do tipo Suezmax DP e um FPSO do tipo VLCC, com amarração *Spread Mooring System* (SMS), com carregamento total (100%) ou em condição lastrado, correspondendo ao início e ao final da operação de alívio, respectivamente. As características tanto do navio aliviador quanto da plataforma, usados para as simulações, estão apresentadas no Apêndice D.

As condições ambientais utilizadas são apresentadas na Tabela 5.9. Estas condições são consideradas prováveis para a Bacia de Campos (TANNURI *et al.*, 2010).

Condiçã	ío Ambiental	Intensidade	Direção
	Correnteza	0,71m/s	S (indo para)
I	Vento	12m/s	NE (vindo de)
Onda		Hs=2,82m; $Tp=6,8s$	NE (vindo de)
	Correnteza	0,71m/s	S (indo para)
II	Vento	10,97m/s	E (vindo de)
	Onda	Hs=1,97m; Tp = 11,2s	SE (vindo de)

Tabela 5.9 Condições Ambientais para a Simulação no TPN

Como se observa na Figura 5.20, quando o alívio é de popa, a resultante da condição ambiental I empurra o navio aliviador contra a FPSO e, portanto, é de se esperar que uma

falha nesta condição torne-se mais crítica. Assim, analisar esta condição é importante já que durante a operação de *offloading* é possível que as condições ambientais mudem repentinamente e resultem em uma condição onde o aliviador seja empurrado contra o FPSO. Consequentemente, conhecer a chance que tem o navio aliviador de sair da zona de operação normal torna-se uma informação fundamental para a tomada de decisão em função do risco.

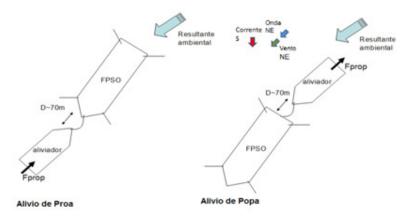


Figura 5.20 Posição logo após a conexão na condição ambiental I.

No caso da condição ambiental. II, como mostra Figura 5.21, nos dois casos de amarração existe a tendência de que o navio aliviador seja empurrado para fora da zona de operação normal e, portanto, no caso especifico de alívio de popa existirá um efeito combinado. Esta condição será o segundo caso de estudo.

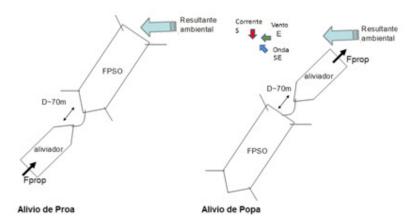


Figura 5.21 Posição logo após a conexão na condição ambiental II.

Assim, as condições ambientais bem como de amarração e calado selecionadas para executar as simulações, e que permitirão calcular a probabilidade que o sistema tem de mudar de um estado de operação aceitável para outro inaceitável, são indicadas Tabela 5.10.

Condição		Cala			
Ambiental	Amarração	Aliviador	FPSO	Código Simulação	
	Proa	Vazio	Cheio	IProaC1	
т <u>—</u>	Proa	Cheio	Vazio	IProaC2	
1	Popa	Vazio	Cheio	IPopaC1	
	Popa	Cheio	Vazio	IPopaC2	
	Proa	Vazio	Cheio	IIProaC1	
II	Proa	Cheio	Vazio	IIProaC2	
	Popa	Vazio	Cheio	IIPopaC1	
	Popa	Cheio	Vazio	IIPopaC2	

Tabela 5.10 Condições Operacionais para a Simulação no TPN.

A seguir, são analisados os resultados de algumas das condições simuladas. Os resultados de todas as condições simuladas são apresentados no Apêndice D. Cada uma das simulações foi realizada simulando 3 horas de operação.

As Figuras 5.22 e 5.23 mostram o comportamento do sistema FPSO - Aliviador tanto para o alívio de proa quanto para o alívio de popa, quando ainda não foi induzida nenhuma falha e o sistema está submetido à condição ambiental I e a FPSO com carregamento total. Na primeira linha dos gráficos, observa-se o movimento do navio aliviador e do FPSO. Verifica-se que sem a presença de falhas, tanto no alívio de proa quanto de popa, o navio aliviador mantém a posição na zona verde, nas condições avaliadas. Os histogramas de frequência mostram que o ângulo entre o FPSO e o navio aliviador, durante o tempo de simulação, é bem inferior ao ângulo de 45 graus. Este fato indica que a chance do navio aliviador encontrar-se fora da zona de operação normal, nestas condições, é bem pequena. Ao observar o comportamento dos Thrusters (linha 2 dos gráficos), no caso do alívio de popa, verifica-se que, para manter a posição, as forças dos três propulsores do DP (Thruster 1, 2 e 3), são inferiores a 300 kN e para o MCP (Thruster 4) é inferior a 100 kN. Porém, a amplitude das forças é um pouco maior no caso do alívio de popa. Este comportamento ocorre quando o alívio está sendo realizado de popa e as condições ambientais empurram o navio aliviador contra o FPSO.

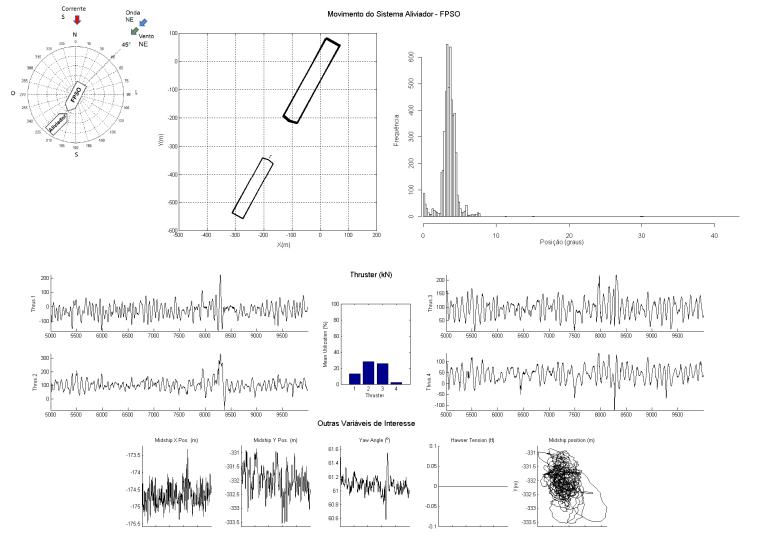
O comportamento do sistema FPSO- Aliviador, na condição ambiental II e o FPSO com carregamento total, é mostrado nas Figuras 5.24 e 5.25. Da mesma forma que na condição ambiental I, na primeira linha do gráfico, observa-se que sem a presença de falhas, tanto na amarração de proa quanto de popa, o navio aliviador mantém a posição nas condições avaliadas. Neste mesmo sentido, os histogramas de frequência mostram que o ângulo entre o FPSO e o navio aliviador, durante o tempo de simulação, é bem inferior ao ângulo de 10

graus, fato este que indicaria que a probabilidade do navio aliviador se encontrar fora da zona de operação normal, nestas condições, é bem pequena. Ao observar o comportamento dos Thrusters, no caso do alívio de popa, verifica-se que para manter a posição é exigido um esforço maior que no caso do alívio de proa. Nos dois tipos de amarração, as forças dos três propulsores do DP (Thruster 1, 2 e 3) são inferiores a 400 kN. No entanto, as forças do MCP na amarração de proa são inferiores a 800 kN enquanto que na amarração de popa, o MCP chega a ter um esforço maior, de 2000 kN.

Portanto, pode-se concluir que, nestas condições de operação, quando não existe evidência sobre a ocorrência de falhas que possam causar perda da posição do navio aliviador, é possível realizar o alívio mantendo os critérios de segurança e não tendo tração significativa no hawser. Um comportamento similar acontece quando o FPSO está em condição lastreado (ver Apêndice D).

Corrente





Movimento do Sistema Aliviador - FPSO

Figura 5.22 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, FPSO (100%), Alívio de Proa, Sem Falhas

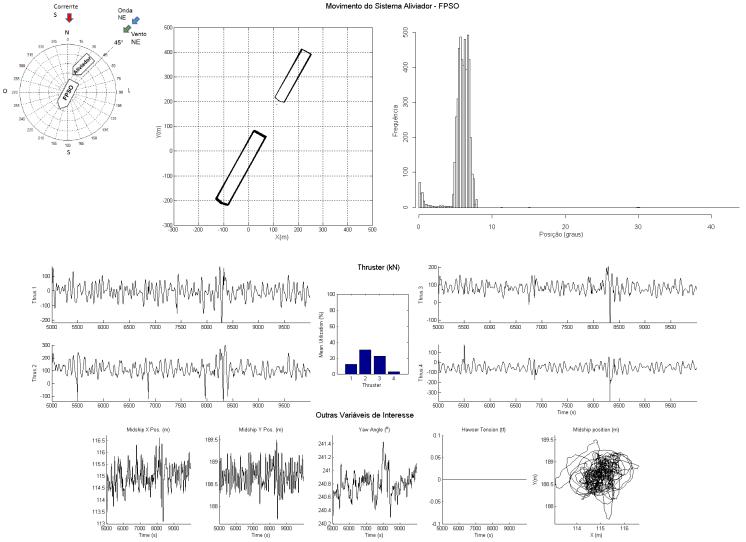


Figura 5.23 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, FPSO (100%), Alívio de Popa, Sem Falhas

C.E. Patino Rodriguez – ANÁLISE DE RISCO EM OPERAÇÕES DE "OFFLOADING" – UM MODELO DE AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DINÂMICA PARA A TOMADA DE DECISÃO

Figura 5.24 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental II, FPSO (100%), Alívio de Proa, Sem Falhas

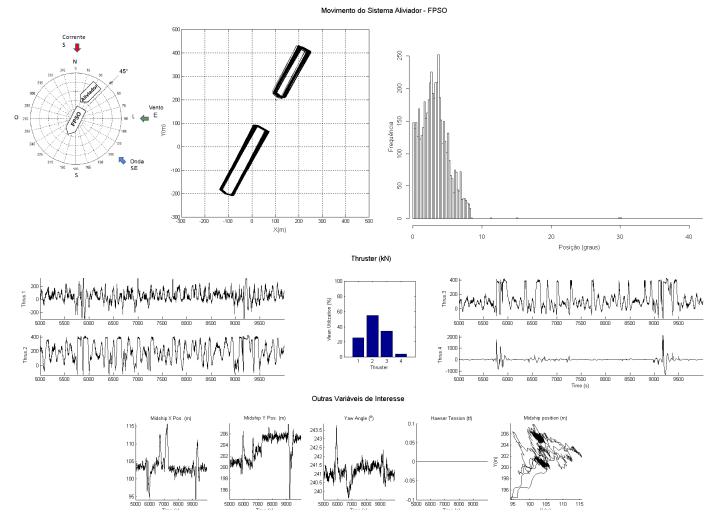


Figura 5.25 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental II, FPSO (100%), Alívio de Popa Sem Falhas

Após a modelagem e simulação da operação do aliviador sem ocorrência de falhas, induziu-se no software TPN cada evento de perigo que aparece na sequência acidental descrita anteriormente.

Assim, a falha no DP é induzida desativando-se um dos propulsores do sistema de posicionamento dinâmico. Quando um navio aliviador perde um propulsor, este não consegue manter o posicionamento em parâmetros adequados de operação e, portanto, a segurança da operação é diminuída, pois manter um posicionamento imperfeito é considerado arriscado (J. SOUZA, 2011). A falha no sistema de acionamento dos propulsores é causada pela perda de sinal, a qual pode ser causada por um problema mecânico ou por um problema eletrônico. Os propulsores têm sua própria máquina motriz, assim, quando esta falhar, não será possível a utilização do DP. Caso exista uma falha na transmissão elétrica ou uma falha no sistema de geração elétrica, não chegará energia na máquina motriz.

Segundo a descrição do sistema realizada no início deste capítulo, as falhas do MCP e do MCA são equivalentes para a análise da perda de posição do navio aliviador. Portanto, estas falhas correspondem ao desligamento do propulsor responsável pela propulsão principal do navio aliviador. Com isso, o funcionamento do motor principal da embarcação é subitamente interrompido, impossibilitando usar o MCP para afastar o navio aliviador da FPSO em caso do DP falhar.

Desta forma, após definir as condições de operação e as condições ambientais, realiza-se a simulação das três sequências acidentais e, em cada caso, determina-se o ângulo entre o navio aliviador e o FPSO em cada instante da simulação e sua função densidade de probabilidade.

Cada evento de perigo é simulado duas vezes onde, em cada caso, varia-se a localização inicial do navio aliviador. No primeiro caso, o navio aliviador é posicionado na zona de operação normal no início da simulação. No segundo caso, no início da simulação, o navio aliviador localiza-se fora da zona de operação normal.

### Análise da simulação da sequência acidental gerada pela falha do DP

Quando acontece a falha do DP, o navio aliviador perde a capacidade de manter a posição, portanto será necessário abortar a operação de *offloading* e afastar o navio aliviador do FPSO com o auxilio do motor de combustão principal (MCP). Para realizar as simulações foi desativado um dos propulsores azimutais.

Na Figura 5.26 observa-se que, quando o alívio é realizado de proa, com o sistema Aliviador-FPSO na condição ambiental I e FPSO cheio (condição 100%), em caso de

ocorrência de falha no DP, o navio aliviador é mantido na zona de operação normal. Entretanto, como se observa no histograma, o ângulo entre o FPSO e o navio aliviador tem uma amplitude maior que no caso sem falha. Portanto, no caso de ocorrer uma falha no DP, existirá uma chance maior do navio aliviador se encontrar fora da zona de operação normal. Na Figura 5.26 também se pode observar que, para manter a posição, o azimutal de proa e o Thruster 1 (Tunnel Thruster Bow) são usados no máximo de sua capacidade. O propulsor do MCP aumenta sua porcentagem de utilização quando comparado com o caso sem falhas, porém esta chega apenas a 20% de utilização.

Para estas mesmas condições, mas no caso de o alívio ser realizado de popa (Figura 5.27), o navio aliviador não é mantido na zona de operação normal e, como se observa na Figura 5.27 a chance de existir abalroação é muito alta. Portanto, no caso de ocorrer uma falha no DP, a chance do navio aliviador se encontrar na zona de operação normal diminui sensivelmente.

Quando o alívio é realizado na popa e o aliviador está submetido à condição ambiental I, os três propulsores ativos são usados quase na sua capacidade máxima. Assim, a amarração de popa na condição ambiental I torna-se mais crítica, já que neste caso as condições ambientais estão empurrando o navio aliviador contra o FPSO e, portanto, uma falha no DP não permitirá a continuidade da operação de alívio devido à alta chance de abalroamento e à impossibilidade de atendimento aos critérios de segurança.

Quando estas mesmas condições operacionais são avaliadas na condição ambiental II, pode-se verificar que tanto no alívio de proa quanto no de popa, existe uma maior movimentação do navio aliviador.

No caso do alívio de proa, nestas condições, embora não haja perda total da posição, existe uma tendência do navio aliviador sair da área de operação normal e, portanto, ângulos maiores entre o FPSO e o aliviador aparecem com maior frequência. Além disso, existem picos de tração do hawser que chegam até 300 tonf, como apresentado na Figura 5.28.

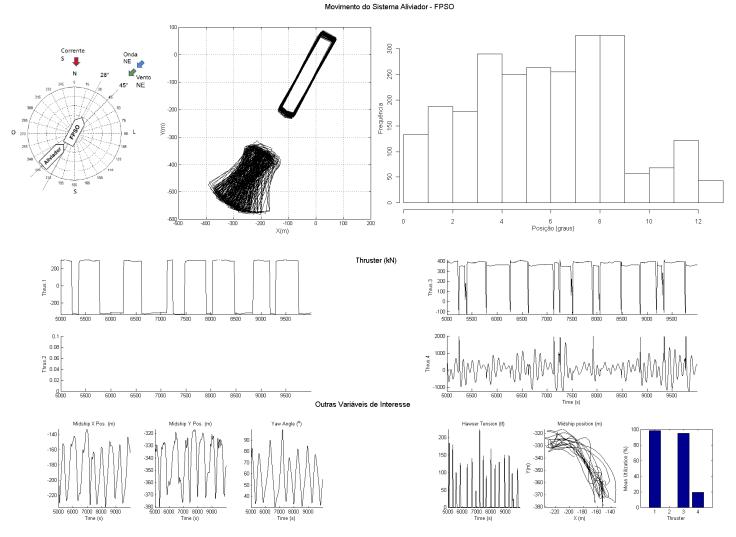


Figura 5.26 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, FPSO (100%), Alívio de Proa, Falha DP

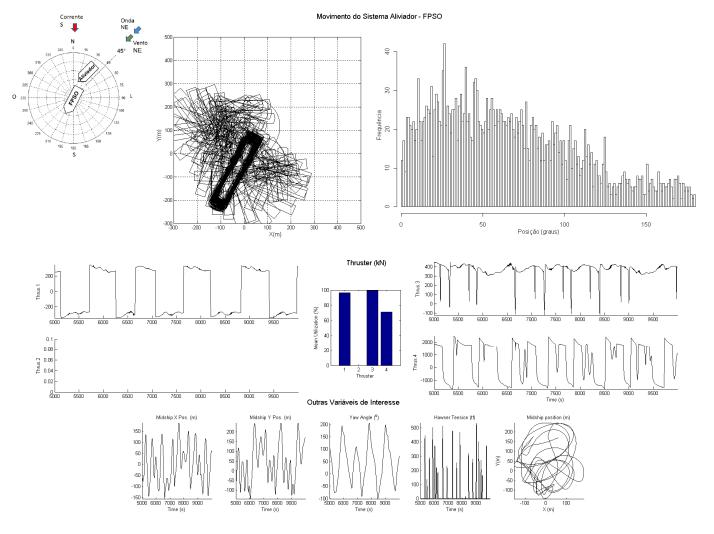


Figura 5.27 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, FPSO (100%), Alívio de Popa, Falha DP

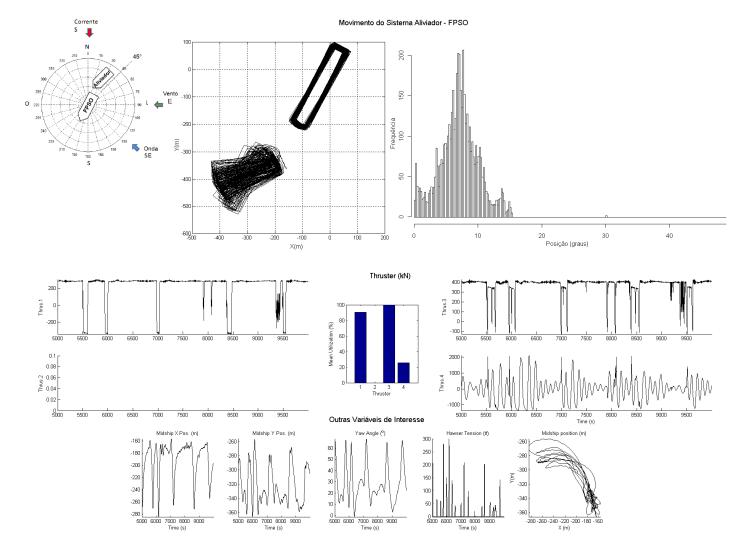


Figura 5.28 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental II, FPSO (100%), Alívio de Proa, Falha DP

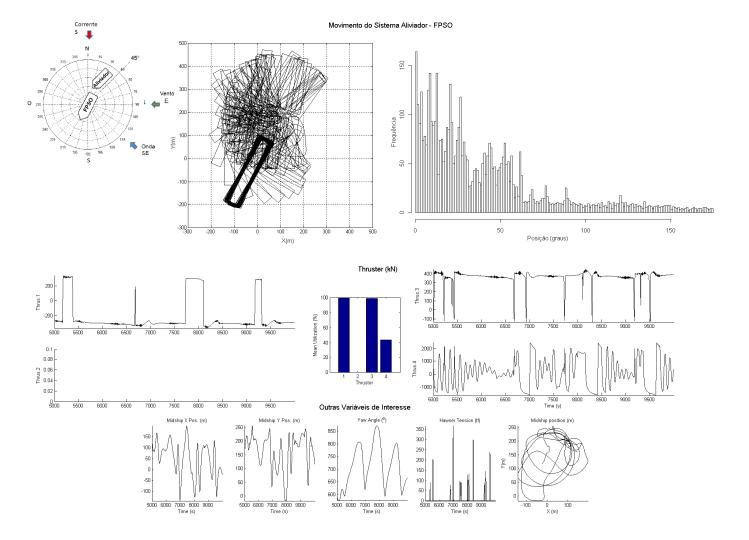


Figura 5.29 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental II, FPSO (100%), Alívio de Popa, Falha DP

Para o caso do alívio de popa, o navio aliviador perde totalmente a posição, como observado na Figura 5.29. Neste caso, existirá uma chance muito alta de abalroamento e por este motivo este problema de decisão passa a ser uma "decisão sob certeza" e, portanto não será considerado dentro da análise de decisão.

Na Figura 5.29 também se pode observar que os propulsores do DP são usados no máximo de sua capacidade. O propulsor do MCP aumenta sua porcentagem de utilização quando comparado com o caso de alívio de proa, estando acima dos 40%.

#### Análise da simulação da sequência acidental gerada pela falha do DP, MCP e/ou MCA

Esta sequência acidental gera a consequência: "Navio aliviador sem propulsão, possibilidade de colisão". Considera-se a falha logo após a conexão do hawser e mangote, no momento em que o navio aliviador está muito próximo ao FPSO. A distância entre os navios pode chegar a 70 m, conforme indica a Figura 5.20 e Figura 5.21.

Para o caso da condição ambiental I e alívio de proa, o navio aliviador será empurrado para longe do FPSO. É o empuxo do propulsor principal que mantém o navio aliviador em sua posição e, portanto, uma falha no DP e no propulsor principal fará com que este se movimente mais. Neste caso, empurrado pela condição ambiental, espera-se que, com a falha do propulsor principal, o navio aliviador recue, podendo causar a mudança na magnitude na tração no hawser, como mostra a Figura 5.30.

Para o caso do alívio de popa, em ambas condições ambientais, o navio aliviador perde totalmente a posição, como observado na Figura 5.31 e no Apêndice D. Neste cenário, a condição ambiental empurra o aliviador na direção do FPSO e, portanto, este cenário é mais crítico em relação à falha em análise. Como se observa no movimento dos navios e no histograma, o ângulo entre o FPSO e, neste caso, existirá uma chance muito alta do navio aliviador abalroar o FPSO, o que torna este caso com uma "decisão sob certeza" e portanto não será analisada no problema de decisão. Neste caso, os propulsores do DP são usados no máximo de sua capacidade.

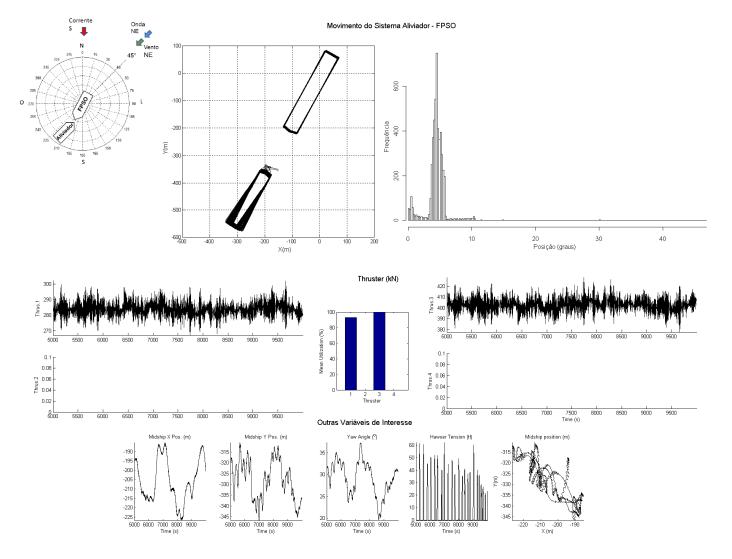


Figura 5.30 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, FPSO (100%), Alívio de Proa, Falha DP e MCP

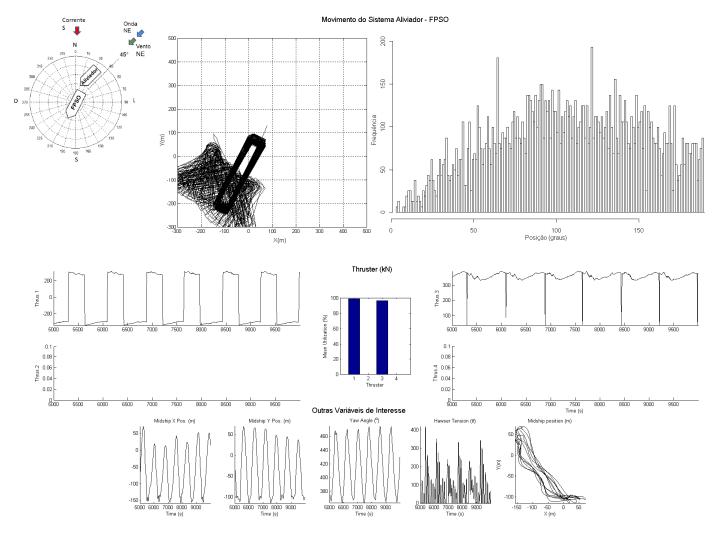


Figura 5.31 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, FPSO (100%), Alívio de Popa, Falha DP e MCP

## 5.5.1.3. Distribuição da Probabilidade da Posição do Navio Aliviador em cada Sequência Acidental

Com os resultados obtidos sobre a posição do FPSO e do navio aliviador, e usando a transformação de coordenadas cartesianas para polares, é calculado o ângulo entre o navio aliviador e o FPSO. Desta forma, obtêm-se o valor da variável aleatória que deverá ser ajustada a uma distribuição de probabilidade. Usando o software Weibull® (WEIBULL++7, 2005) e realizado o algoritmo no programa R (R Core, 2008), apresentado no Apêndice D.1, ajustou-se a distribuição da posição angular do navio aliviador em relação ao FPSO em cada sequência acidental, para os dois estados estabelecidos no item 5.5.1.1.

Em todos os casos, a distribuição de Weibull apresenta a melhor aderência aos dados da posição angular. Os parâmetros obtidos, em cada caso simulado, são apresentados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 Parâmetros da distribuição da posição angular do navio aliviador em cada estado e sequência acidental

Simulação	Estado	Sem Falha	Falha DP	Falha DP e MCP/MCA	Equação da taxa de transição (para θ <sub>k</sub> =45)
IProaC1	$S_1$	β=1,2841; η= 4,1814	$\beta$ =1,2341; $\eta$ = 5,5910	β=1,3422; η= 5,1264	
IPTOaCI	$S_2$	β=0,9944; η= 8,2751	$\beta$ =1,0732; $\eta$ = 6,3884	β=1,31565; η= 7,1047	
IProaC2	$S_1$	β=0,9664; η= 1,3434	β=1,8559; η=10,7977	β=1,3948; η=6,1043	
IP10aC2	$S_2$	β=0,8036; η=4,5180	β=1,8692; η=12,6737	β=1,0827; η=6,9609	
IPopaC1	$S_1$	β=1,4996; η=6,7894	β=1,3149; η=83,1371	β=2,1189; η=147,2622	
т орас т	$S_2$	β=1,2503; η=8,7358	β=1,9766; η=93,8731	β=5,1116; η=152,6603	
IPopaC2	$S_1$	β=1,0248; η=1,6545	β=1,0182; η=61,4568	β=1,9109; η=142,0411	
ir opac2	$S_2$	β=1,2780; η=70,4201	β=1,6583; η=79,1134	β=5,7795; η=145,8887	$-\frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{\theta_k}{\eta}\right)^{\beta-1}$
IIProaC1	$S_1$	β=1,0124; η=2,7873	β=1,4835; η=8,1039	β=1,5939; η=9,1327	$\frac{\overline{\eta}}{\eta} \cdot \left( \frac{\overline{\eta}}{\eta} \right)$
1110aC1	$S_2$	β=0,8876; η=3,8154	β=1,4161; η=12,8943	β=6,7913; η=39,1666	
IIProaC2	$S_1$	β=1,5976; η=7,3113	β=1,3657; η=5,0014	β=1,6905; η=9,9268	<u></u>
	$S_2$	β=1,1734; η=14,1016	β=1,0544; η=7,8379	β=1,6995; η=14,2927	<u></u>
IIPopaC1	$S_1$	β=1,1066; η=3,6429	β=1,1078; η=63,9941	β=3,1492; η=102,3083	<u></u>
	$S_2$	β=0,8250; η=4,2432	β=1,3951; η=44,5605	β=5,2387; η=103,3467	<u></u>
IIPopaC2	$S_1$	β=1,8068; η=10,2320	β=1,0167; η=40,4020	β=0,9077; η=94,3591	<u></u>
	$S_2$	β=1,2227; η=72,9813	β=1,0907; η=54,9707	β=4,6445; η=150,0998	

Como já foi mencionado, em cada caso foram realizadas duas simulações, na primeira simulação, que serve para calcular os parâmetros associados a S<sub>1</sub>, a posição inicial do navio aliviador é fixada dentro da zona de operação normal. Na segunda simulação, cujos resultados foram usados para determinar os parâmetros, a posição inicial do navio aliviador é fixada fora da zona de operação normal.

A partir da distribuição probabilística da posição pode-se analisar o comportamento do navio aliviador com respeito às condições de operação. Assim, usando os parâmetros da distribuição de probabilidade para cada condição simulada, pode-se calcular a probabilidade de que o navio aliviador permaneça ou retorne à zona normal de operação. Para fazer este cálculo, considerou-se que a operação de *offloading* sai da zona de operação normal quando o ângulo entre o FPSO e o navio aliviador é maior do que 45° (MORATELLI, 2010).

A Figura 5.32 mostra os resultados da probabilidade onde, na presença de uma sequência acidental, o navio aliviador esteja na zona de operação normal dado que inicialmente está nesta zona, ou seja, em outras palavras, este gráfico mostra a chance de que, ainda ocorrendo falhas, o navio aliviador permaneça na zona de operação normal. Para realizar este cálculo, consideramse os resultados da posição do navio aliviador, localizado no início da simulação dentro da zona de operação normal, e avalia-se a distribuição de probabilidade quando a posição angular entre o navio aliviador e o FPSO é menor que 45°. Pode-se verificar então que, quando o alívio é de popa, o navio aliviador tem menor chance de ficar na zona de operação normal do que quando o alívio é de proa. No mesmo sentido, pode-se verificar que as falhas do DP e do MCP trazem como consequência uma redução da chance que o navio aliviador tem de permanecer na zona de operação normal.

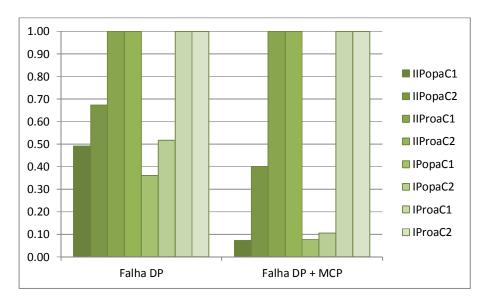


Figura 5.32 Probabilidade do navio aliviador permanecer na zona normal de operação

Na Figura 5.33 é analisada a chance que o navio aliviador tem de retornar à zona de operação normal após da ocorrência de falhas, ou seja, a probabilidade que o navio aliviador tem de estar na zona de operação normal, dado que inicialmente está fora desta zona. Este cálculo é realizado avaliando-se a distribuição de probabilidade da posição angular do navio aliviador quando esta é menor que 45°, dado que o navio aliviador se localiza, ao início da simulação, fora da zona de operação normal. Pode-se verificar que, quando o alívio é de popa e ocorrem as falhas no DP e MCP simultaneamente, se o navio aliviador sai da zona normal de operação terá uma chance quase nula de retornar para a zona normal de operação.

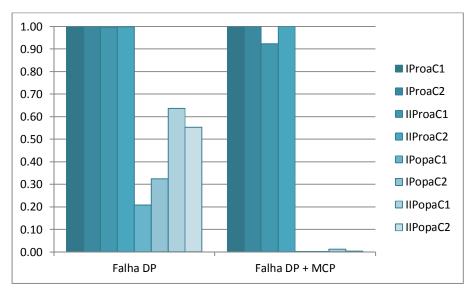


Figura 5.33 Probabilidade do navio aliviador retornar na zona normal de operação

Portanto, ao analisar as probabilidades de permanecer e retornar à zona de operação normal, pode-se verificar que, para as duas condições ambientais estudadas, o alívio de popa é uma condição muito mais crítica que o alívio de proa. A ocorrência de uma falha na condição de alívio de popa causaria um aumento significativo na probabilidade do navio aliviador sair da zona de operação normal, o que se tornaria uma condição inaceitável para a operação. Estes resultados tornam-se especialmente relevantes quando ocorre uma mudança repentina das condições ambientais e as novas condições são tais que o navio aliviador é empurrado contra o FPSO, como se observa nas Figuras 5.32 e 5.33. Nesta condição (alívio de popa), a chance do aliviador estar na zona de operação normal fica significativamente reduzida, sendo muito mais crítico o cenário quando, nesta condição de amarração, o navio aliviador tem que retornar à zona de operação normal.

Neste contexto, tendo os parâmetros das distribuições de probabilidades do navio aliviador permanecer em uma das duas zonas de operação (Tabela 5.11) e considerando que o navio aliviador durante a operação de *offloading* pode ter transições entre os dois estados, calcula-se a probabilidade do navio aliviador estar em um dado estado de operação dada uma sequência acidental (**P**(**S**<sub>i</sub>|**K**)), como mostram a Tabela 5.12 e a Figura 5.34. Para encontrar estas probabilidades, foi usado o equacionamento para o processo Semi-Markov, apresentado na Seção 3.3.2.2 e o algoritmo recorrente apresentado na Figura 4.10 foi realizado em Matlab, como mostra o Apêndice E.

Tabela 5.12 Probabilidade do navio aliviador se encontrar em S<sub>1</sub> ou S<sub>2</sub> dada uma sequência acidental

Simulação	Estado S <sub>i</sub>	Sem Falha P(S <sub>i</sub>  K <sub>A</sub> )	Falha DP P(S <sub>i</sub>  K <sub>B</sub> )	Falha DP + MCP P(S <sub>i</sub>  K <sub>C</sub> )
ID G1	$S_1$	0,999629	0,999953	0,999998
IProaC1	$\overline{S_2}$	0,000371	0,000047	0,000002
IProaC2	$S_1$	0,999868	0,999928	0,999964
IProaC2	$\overline{S_2}$	0,000132	0,000082	0,000036
IDonoC1	$S_1$	0,999964	0,288579	0,023313
IPopaC1	$S_2$	0,000036	0,711421*	0,976686*
IDamaC2	$S_1$	0,790049	0,434133	0,035076
IPopaC2	$\overline{S_2}$	0,209951	0,565867*	0,964924*
IIProaC1	$S_1$	0,999988	0,999467	0,900504
	$S_2$	0,000012	0,000533	0,099496
IIProaC2	$S_1$	0,997427	0,999881	0,999817
IIP10aC2	$\overline{S_2}$	0,002573	0,000119	0,000182
IIPopaC1	$S_1$	0,999908	0,552207	0,035489
	$\overline{S_2}$	0,000092	0,447793	0,964511*
IIDonoC2	$S_1$	0,704736	0,611871	0,195398
IIPopaC2	$S_2$	0,295263	0,388129	0,804602*

<sup>\*</sup> Navio Aliviador abalroa contra FPSO.

A análise probabilística verifica o resultado dado pelo simulador onde foi mostrado que nas condições ambientais de alivio de popa para a falha do DP e a falha do DP e MCP existe abalroamento entre o navio aliviador e a FPSO.

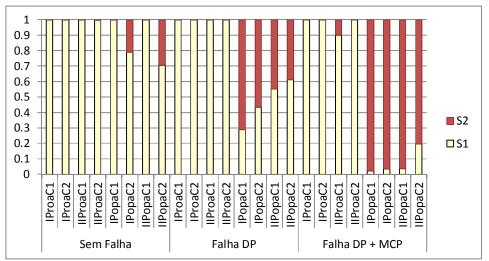


Figura 5.34 Probabilidade do navio aliviador se encontrar em um estado de operação dada uma sequência acidental

Destes resultados, pode-se verificar que quando não existe ocorrência de falhas nos sistemas de posicionamento do navio aliviador, existe uma chance muito maior do navio aliviador manterse dentro da zona de operação normal, durante a operação de *offloading*, tanto nas duas condições ambientais quanto nas duas condições de carregamento simuladas. Porém, deve-se ter especial atenção quando o navio aliviador estiver na fase final do carregamento (C2) e a resultante da ação dos carregamentos ambientais empurrem o navio aliviador contra o FPSO, pois, como se observa nos resultados, nestas condições, a probabilidade do navio aliviador estar fora da zona de operação normal aumenta. Neste caso, por exemplo, na condição ambiental I esta probabilidade é de 21% e no caso da condição ambiental II, esta corresponde a 29%.

Os resultados mostram que quando acontecem sequências acidentais que causam perda de posicionamento, o tipo de alívio (popa ou proa) é muito relevante para aumentar a chance de navio aliviador estar fora da zona de operação normal, assim, por exemplo, se falha o DP, na condição ambiental I e a operação de *offloading* está na fase final do carregamento (C2), existe uma chance de 56% de que o navio aliviador esteja fora da zona de operação normal quando a amarração é de popa, já para as mesmas condições, quando a amarração é de proa, esta chance é apenas de 0,01%.

Na presença de falhas, quando a amarração é de popa, a condição ambiental I é mais crítica que a condição ambiental II. Este comportamento pode ser explicado devido ao fato de que, no alívio de popa, a resultante da condição ambiental I empurra diretamente o navio aliviador contra o FPSO.

### 5.5.1.4. Tomada de decisão dada uma sequência acidental

Como se verificou na seção anterior, a condição de alívio na qual o navio aliviador é empurrado contra o FPSO torna-se crítica dentro desta análise. Com a informação sobre as probabilidades de localização do navio aliviador, pode-se analisar a decisão de interromper ou continuar a operação, quando o navio aliviador estiver no limite da zona de operação normal  $(\theta=45^{\circ})$  e uma das sequências acidentais mostradas na Figura 5.12 se apresente.

Da Tabela 5.13 à Tabela 5.15 apresentam-se os possíveis resultados da decisão dada a ocorrência de uma sequência acidental. Neste caso, os estados da natureza estão dados pelas duas zonas operacionais que o navio aliviador pode atingir, uma vez que a sequência acidental aconteça.

Tabela 5.13 Alternativas para a seleção da estratégia de operação dado que não aconteceu falha

CONHECIMENTO	Estados da Natureza	Decisão	
A PRIORI		Continuar	Interromper
Não há Falha	Estar na zona de	Offloading com sucesso	Perde a possibilidade de ter
	operação normal - S1		o offloading com sucesso
	Estar fora da zona de	Interromper a operação até	Decisão Correta (Condições
	operação normal - S2	as condições melhorem	desfavoráveis)

Tabela 5.14 Alternativas para a seleção da estratégia de operação dado que falha o DP

CONHECIMENTO	Estados da Natureza	Decisão		
A PRIORI		Continuar	Interromper	
Falha DP	Estar na zona de operação normal - S1	Offloading pode ser finalizado com precauções associadas à monitoração do navio	Perde a possibilidade de finalizar o offloading	
	Estar fora da zona de	Desconexão de emergência.	Decisão Correta (Evitou-se	
	operação normal - S2	Abortar a operação	desconexão de emergência)	

Tabela 5.15 Alternativas para a seleção da estratégia de operação dado que falha o DP e MCP/MCA

CONHECIMENTO	Estados da Natureza	Decisão		
A PRIORI		Continuar	Interromper	
Falha DP e MCP/MCA	Estar na zona de operação normal - S1	Possibilidade de colisão com impacto médio causando consequências severas	Decisão Correta (Não haverá perda)	
railla DF e MCF/MCA	Estar fora da zona de operação normal - S2	Possibilidade de colisão com impacto alto, causando consequências catastróficas.	Possibilidade de colisão com impacto baixo, causando consequências reduzidas.	

Para definir a função utilidade das consequências finais de cada uma das alternativas, deve-se levar em consideração que os navios aliviadores são regidos por contratos de viagem isolada ou por tempo determinado. Assim, se for decidido interromper a operação de *offloading* e for verificado que a interrupção foi de responsabilidade do navio aliviador, por problema mecânico ou alguma razão que o impeça de operar, este terá multas e cartas de protesto que são estipuladas nos contratos, além de deixar de receber a diária do serviço contratado. Caso a interrupção de operação seja considerada como uma consequência de ocorrência de condições ambientais não apropriadas para realizar o alívio, a responsabilidade é dividida entre o FPSO e o navio aliviador. Porém, dada a dificuldade de obter os custos para cada uma das categorias, usa-se uma escala de pontuação, conforme metodologia recomendada por Migon e Lopes (2002) nestes casos.

Desta forma, usando a função padronizada para a função de utilidade tipo exponencial, que é apresentada na Tabela 4.2, estabelece-se uma escala de pontuação 0 a 1 para x, associando, assim, um valor de x=1 para a maior perda (pior consequência) e x=0 para a menor perda (melhor cenário). Para os outros níveis de consequências, os valores de x associados estarão no intervalo 0 e 1. Assim, após ter a escala de pontuação para x, obtém-se a função utilidade para cada uma das consequências. Neste estudo, os valores destas pontuações para x foram estabelecidos por operadores do sistema. Estes operadores selecionaram os valores de uma tabela que eles mesmos elaboraram baseados na sua experiência de mais de vinte anos na operação de navio desta natureza. As árvores de decisão associados aos problemas em estudo são apresentadas na Figura 5.35.

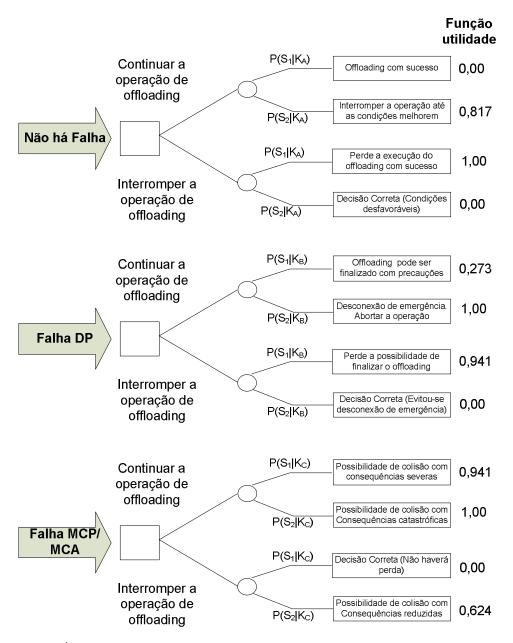


Figura 5.35 Árvores de decisão para continuar ou interromper a operação sabendo que uma sequência acidental ocorreu

Como a maior perda foi pontuada com o valor de 1, então a decisão corresponderá à alternativa que minimize o risco. A avaliação detalhada da árvore de decisão é apresentada no Apêndice F. O resumo dos resultados da avaliação do risco, para cada uma das condições simuladas, está mostrado na Tabela 5.16.

Não Falha Falha DP Falha DP e MCP/MCA Valor de risco Decisão Valor de risco Decisão Valor de risco Decisão (menor (menor (menor **Continuar Interromper Continuar Interromper Continuar Interromper** risco) risco) risco) CONT **CONT** INTER 0,27280 0,94147 IProaC1 0,00030 0.99963 0,94143 0,00000 **CONT CONT INTER** IProaC2 0,99987 0,27286 0,94148 0,00002 0,00011 0,94135 **CONT INTER** INTER 0,00003 0,99996 IPopaC1 Decisão sob certeza Decisão sob certeza CONT INTER INTER IPopaC2 0,17165 0,79005 CONT **CONT INTER** 0,06214 0.99999 0.27315 0.94097 0.94730 IIProaC1 0,00001 **CONT INTER** CONT 0,27285 0,94148 IIProaC2 0,99743 0,94136 0,00011 0,00210 INTER **CONT** INTER IIPopaC1 0,00008 0.59841 0.99991 0.51989 Decisão sob certeza INTER **INTER** CONT IIPopaC2 0,24140 0,70474 Decisão sob certeza

Tabela 5.16 Valor da avaliação do risco da mudança da estratégia de operação quando ocorre uma sequência acidental

CONT: Continuar a operação de offloading INTER: Abortar a operação de offloading

Dos resultados apresentados na Tabela 5.16 pode-se observar que, caso não ocorram falhas no sistema em todas as condições ambientais, a decisão que minimiza a perda é continuar com a operação. Porém, quando o navio aliviador está 100% carregado e a amarração é de popa observase que, embora o risco não seja máximo, este aumenta nas duas condições ambientais simuladas. No caso de ocorrer uma falha no sistema DP, a sugestão, para as condições simuladas, é continuar a operação sempre que a amarração seja de proa. E, como era de se esperar, caso o navio aliviador fique à deriva, a decisão sempre será interromper a operação, já que as consequências desta sequência acidental são graves ou catastróficas.

Estes resultados junto com a análise de custos (neste caso, através da função de utilidade), torna-se uma ferramenta para a tomada de decisão, já que finalmente o tomador de decisão saberá o risco de mudar ou não a estratégia de operação.

## 5.5.2. Probabilidade de uma Sequência Acidental Acontecer dada uma Mudança de Estado

Como se observa nos resultados apresentados na seção 5.5.1, dada a natureza da operação, existe uma chance de que o navio aliviador esteja fora da zona de operação normal. Além disso, quando acontece uma sequência acidental, esta chance muda e geralmente aumenta.

Na seção anterior, foi analisada a chance que existe de que o navio aliviador esteja em uma das duas zonas de operação devido à ocorrência de uma sequência acidental. Neste item, com estes resultados, analisa-se qual é a chance de uma determinada sequência acidental acontecer quando o navio aliviador passa da zona de operação normal para fora desta. Esta chance é avaliada usando o modelo matemático proposto do Capítulo 4, em conformidade com a eq. (5.4).

$$P(K_j|S_{12}) = \frac{P(S_{12}|K_j) \cdot P(K_j)}{P(S_{12})}$$
 (5.4)

Neste caso, o termo  $P(S_{12})$  corresponde à probabilidade de que o sistema esteja na zona normal operação em um tempo t e passe para fora desta zona em um tempo  $t+\Delta t$ , ou seja, a probabilidade de que o navio aliviador saia da zona de operação normal, dado que ainda está dentro da mesma. Portanto, com a informação obtida das simulações, a probabilidade do navio aliviador passar da zona de operação normal para fora desta, dado uma sequência acidental, pode ser calculada, como mostra a eq. (5.5).

$$P(S_{12}|K_j) = P\{(\theta_{t+\Delta t} > 45^{\circ}|\theta_t \le 45^{\circ})|K_j\}$$

$$\frac{f(\theta)|K_j)}{F(\theta|K_j)}$$
(5.5)

Como se observa na Figura 5.36, a probabilidade de que o sistema saia da zona de operação normal quando não existem falhas nos sistemas associados ao posicionamento do navio aliviador é praticamente nula, em todas as condições analisadas.

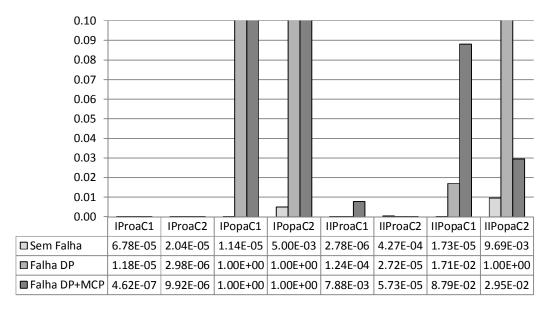


Figura 5.36 Probabilidade do navio aliviador sair da zona de operação normal (P<sub>12</sub>|K)

Neste caso, têm-se três sequências acidentais (ver Figura 5.12). Desta forma, tornam-se possíveis as seguintes consequências, onde interromper se refere a suspender a operação até que as condições melhorem, enquanto abortar se refere a que não é possível continuar com a operação:

A: Interromper *offloading* e afastar com o DP

B: Abortar offloading e afastar com o MCP

C: Navio aliviador sem propulsão, possibilidade de colisão.

A probabilidade de interromper o *offloading*, sendo necessário afastar o navio aliviador com DP, quando este mudou da zona de operação normal para fora desta, é definida pela eq. (5.6):

$$P(K_A|S_{12}) = \frac{P(S_{12}|K_A) \cdot P(K_A)}{P(S_{12})}$$
(5.6)

A probabilidade de abortar o *offloading*, sendo necessário afastar o navio aliviador com ajuda do MCP, quando este mudou da zona de operação normal para fora desta, é definida pela eq. (5.7):

$$P(K_B|S_{12}) = \frac{P(S_{12}|K_B) \cdot P(K_B)}{P(S_{12})}$$
(5.7)

Portanto, a probabilidade do navio aliviador ficar sem propulsão e, assim, existir a possibilidade de uma colisão com alto impacto e consequências catastróficas, quando este mudou da zona de operação normal para a fora desta, é definida pela eq. (5.8):

$$P(K_C|S_{12}) = \frac{P(S_{12}|K_C) \cdot P(K_C)}{P(S_{12})}$$
 (5.8)

A partir dos resultados obtidos nas fases anteriores e com a aplicação do modelo matemático mostrado nas eq.(5.6), eq. (5.7) e eq. (5.8), obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 5.17, que correspondem à chance de que, durante a operação de *offloading*, devido a uma mudança das condições de operação do sistema (navio aliviador passou da zona de operação normal para fora da zona de operação normal), exista uma determinada sequência acidental. Dos resultados obtidos, pode-se concluir que quando o navio aliviador muda da zona de operação normal para fora desta, as consequências menos graves são muito mais prováveis do que as consequências mais severas. Este é um resultado comum para todas as condições simuladas. Este resultado pode ser explicado devido a que a chance que ocorra a falha do DP e MCP/MCA, durante a mesma operação, é remota.

Simulação	$P(K_A S_{12})$	$P(K_B S_{12})$	$P(K_C S_{12})$
IProaC1	9,99938E-01	6,23645E-05	1,15693E-08
IProaC2	9,99946E-01	5,26782E-05	8,26890E-07
IPopaC1	3,04356E-02	9,65007E-01	4,55789E-03
IPopaC2	9,32514E-01	6,71692E-02	3,17252E-04
IIProaC1	9,79611E-01	1,56739E-02	4,71509E-03
IIProaC2	9,99977E-01	2,29215E-05	2,28191E-07
IIPopaC1	7,33342E-01	2,60330E-01	6,32806E-03
IIPopaC2	9,64168E-01	3,58267E-02	4,99125E-06

Tabela 5.17 Probabilidade que uma consequência ocorra dado que o navio mudou de zona de operação S1 para S2

Porém, merece especial atenção a situação onde o alívio é de popa, nas duas condições ambientais e no começo do offloading. Nestas condições, quando o navio aliviador muda de zona de operação, verifica-se que a chance de ter que abortar o *offloading*, sendo necessário afastar o navio aliviador com ajuda do MCP, ou a chance que o navio aliviador fique à deriva, aumenta significativamente. Embora a condição mais provável seja de interromper o *offloading*, sendo necessário afastar o navio aliviador com DP, quando este mudou da zona de operação normal para fora desta, pode se observar que, especialmente quando o alívio é de popa, a probabilidade de abortar o *offloading*, sendo necessário afastar o navio aliviador com ajuda do MCP, quando este mudou da zona de operação normal para fora desta, é alta.

Portanto, analisando o comportamento das consequências B e C nas condições simuladas, apresentadas na Figura 5.37, a consequência C tem uma chance mais remota de acontecer. No entanto, verifica-se que o alívio de popa para estas condições é mais crítico. Na condição ambiental II, no alívio de proa, a probabilidade de que a consequência C aconteça, quando o navio aliviador muda de posição, não é desprezível quando comparada com as outras condições simuladas.

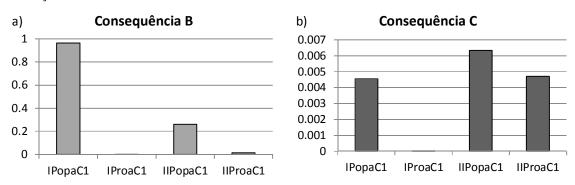


Figura 5.37 a) Probabilidade da consequência B acontecer dado que o navio aliviador saiu da zona de operação normal, FPSO 100%; b) Probabilidade da consequência C acontecer dado que o navio aliviador saiu da zona de operação normal, FPSO 100%

Embora as probabilidades de uma determinada consequência acontecer no final da operação de offloading sejam pequenas, quando comparadas entre si, pode-se verificar que nesta condição o alívio de popa novamente é mais crítico que o alívio de proa, sendo pior na condição ambiental I que na condição ambiental II, como mostra a Figura 5.38.

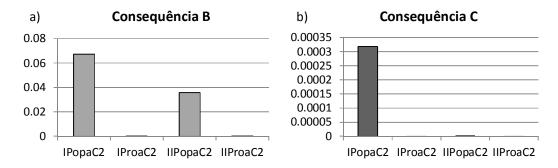


Figura 5.38 a) Probabilidade da consequência B acontecer dado que o navio aliviador saiu da zona de operação normal, Aliviador 100%; b) Probabilidade da consequência C acontecer dado que o navio aliviador saiu da zona de operação normal, Aliviador 100%

Verifica-se uma vez mais que a condição de alívio na qual o navio aliviador é empurrado contra o FPSO torna-se crítica dentro do processo, porém esta é muito mais crítica no começo da operação de *offloading* que no final da mesma.

Estes resultados, junto com a análise de custos (neste caso através da função de utilidade), tornam-se uma ferramenta para a tomada de decisão, uma vez que finalmente o tomador de decisão saberá o risco de mudar ou não a estratégia de operação.

A árvore de decisão apresentada na Figura 5.39 está elaborada para permitir a tomada de decisão sobre a interrupção ou continuação da operação de *offloading*, no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal ( $\theta$ =45°).

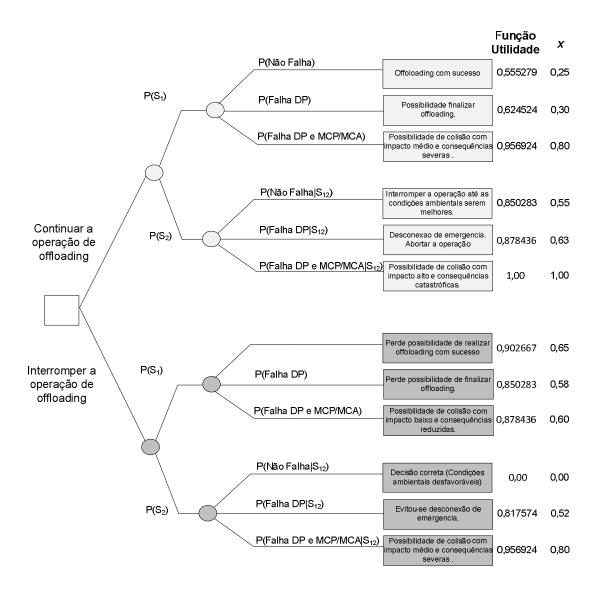


Figura 5.39 Árvore de decisão para a operação de offloading.

As consequências que aparecem no nível final da árvore de decisão da Figura 5.39 correspondem aos diferentes níveis de consequências encontrados na análise preliminar de perigos que constam no Apêndice B.

Para definir a função utilidade das consequências finais das alternativas, dada a dificuldade de obter os custos para cada uma das categorias, usa-se o mesmo procedimento explicado na seção anterior. Como a maior perda foi pontuada com o valor de 1, então a decisão corresponderá àquela alternativa que minimize o risco. A avaliação detalhada da árvore de decisão é apresentada no Apêndice F e o resumo dos resultados da avaliação do risco, para cada uma das condições simuladas, está mostrada na Tabela 5.18.

Continuar Interromper Decisão CONTINUAR IProaC1 0,732009256 0,898054592 IProaC2 0,731980977 0,898269294 **CONTINUAR** IPopaC1 0,731970136 0,688245911 **INTERROMPER** IPopaC2 0,756815784 0,710030541 **INTERROMPER** IIProaC1 0,731966793 0,898377302 **CONTINUAR** IIProaC2 0,732269793 0,896076372 **CONTINUAR** IIPopaC1 0,731977006 0,898325362 **CONTINUAR** 0,776804019 INTERROMPER IIPopaC2 0,453759123

Tabela 5.18 Avaliação do risco

## **5.6.** CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta a aplicação do método que apoia a tomada de decisão baseada em uma análise probabilística do risco, usando uma abordagem dinâmica que considera a atualização de probabilidades quando existem novas evidências e a chance que as condições operacionais mudem no decorrer do processo. A aplicação do método compreende quatro etapas sequenciais: (i) identificação dos cenários de perigos, (ii) estimação da probabilidade de ocorrência de falhas para cada cenário, (iii) avaliação das consequências, e, (iv) tomada de decisão. Estas etapas permitem realizar uma comparação probabilística de oito condições ambientais simuladas, para finalmente tomar a decisão de continuar ou interromper a operação.

Os resultados probabilísticos, junto com a análise de custos (neste caso através da função de utilidade), tornam-se uma ferramenta para a tomada de decisão já que finalmente o tomador de decisão saberá o risco de mudar ou não a estratégia de operação em função da análise probabilística.

Neste estudo, a decisão de interromper ou continuar a operação de *offloading* foi dividida em duas situações: 1) quando existe a chance de estar na zona de operação normal ou fora desta, se previamente acontece falha o DP ou falham DP e MCP/MCA ou não acontece falha nos sistemas de posicionamento do navio aliviador; 2) quando as falhas ocorrem depois da mudança de zona de operação (da zona de operação normal, para fora desta zona). A partir dos resultados probabilísticos e de análise de decisão pode-se concluir que os casos quando o navio aliviador fica em uma condição onde este é empurrado contra o FPSO tornam-se críticas para a operação.

Considerando que a decisão é sensível aos valores selecionados para a pontuação dada a x e como a seleção destes valores corresponde à percepção de operadores do sistema, a análise de

sensibilidade dará uma informação muito importante para avaliar a incerteza associada com a decisão. Esta análise é apresentada no Capítulo 6.

## CAPÍTULO 6 VALIDAÇÃO DO MODELO E DOS RESULTADOS

## **6.1.** CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A análise de decisão usa como entrada fundamental julgamentos do tomador de decisão através de suas preferências e crenças. Tanto a distribuição a priori quanto a função de perda ou utilidade impactam a solução final do problema de decisão. Neste sentido, a validação de resultados é uma etapa importante na análise de decisão, já que permite avaliar variações destes elementos de análise nos resultados finais (MIGON e LOPES, 2002).

Por outro lado, a validação da decisão pode ser realizada considerando a sensibilidade do valor da variável dependente devido a mudanças dos valores das variáveis independentes e examinando o impacto que estas variações têm na decisão final.

Neste sentido, a seguir, serão validadas as entradas do modelo matemático apresentado na eq. (5.4), as quais podem ser divididas em três partes. A primeira inclui a validação estatística da seleção de parâmetros para as distribuições de probabilidade do navio aliviador sair da zona de operação normal devido a uma sequência acidental acontecer. A segunda corresponde à validação do algoritmo recorrente e, posteriormente, será realizada a análise de sensibilidade da função utilidade para analisar o processo de tomada de decisão.

# **6.2.** VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA DA SELEÇÃO DE PARÂMETROS PARA AS DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

A validação desta parte do modelo matemático será realizada através de testes de aderência das funções distribuição da posição do navio aliviador. Ao se ajustar uma distribuição de probabilidade a um conjunto de dados, trabalha-se com a hipótese de que a distribuição pode representar adequadamente a posição do navio aliviador em cada estado e sequência acidental. Para verificar esta hipótese, é avaliado se os dados amostrais se aproximam razoavelmente de uma determinada distribuição. As duas hipóteses são:

H<sub>0</sub>: A amostra provém de uma população que segue a distribuição de probabilidade

H<sub>1</sub>: A amostra não provém de uma população que segue a distribuição de probabilidade Neste caso, foi utilizado o teste de aderência por Kolmogorov-Smirnov. Para realizar o teste, utiliza-se a função distribuição acumulada observada, compara-se com a teórica, determina-se o ponto em que estas distribuições mais divergem e verifica-se se essa divergência é aleatória ou não. Portanto, considera-se F(x) a proporção dos valores esperados menores ou iguais a x e S(x) a proporção dos valores observados menores ou iguais a x, calcula-se o desvio máximo destes dois valores e compara-se o módulo do desvio máximo observado (D) com o desvio máximo tabelado (Dtab). Se D for menor, existe concordância entre as frequências observadas e esperadas, e a amostra provém de uma população que segue a distribuição de probabilidade sob teste. Ao valor tabelado, associa-se o valor observado, o seu valor-p (p-Value), onde o valor-p corresponde à probabilidade de que a amostra possa ter sido tirada da população, assumindo que a hipótese nula seja verdadeira.

Os parâmetros da distribuição que serão testados foram sugeridos pelo software Weibull ® (WEIBULL++7, 2005). O teste foi realizado no software R (R Core, 2008) que calcula diretamente o valor D e o p-value. Para todas as condições simuladas, a distribuição de Weibull mostra-se como uma distribuição adequada para modelar a posição do navio aliviador. Os resultados deste testes são apresentados na Tabela 6.1 à Tabela 6.8.

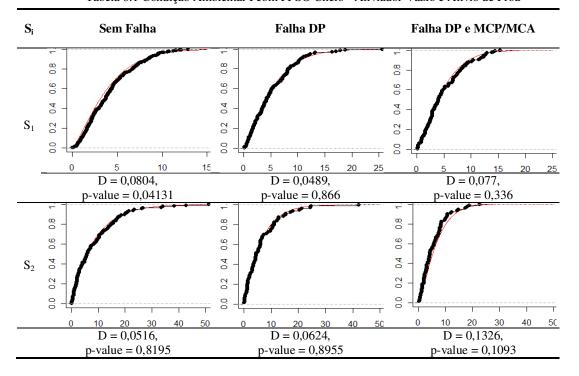


Tabela 6.1 Condição Ambiental I com FPSO Cheio - Aliviador Vazio e Alívio de Proa

Tabela 6.2 Condição Ambiental I com FPSO Vazio - Aliviador Cheio e Alívio de Proa

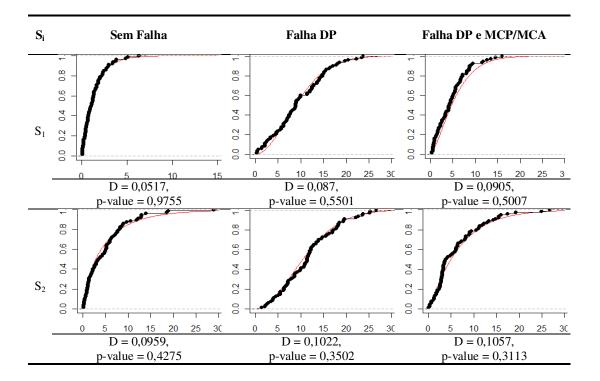


Tabela 6.3 Condição Ambiental I com FPSO Cheio - Aliviador Vazio e Alívio de Popa

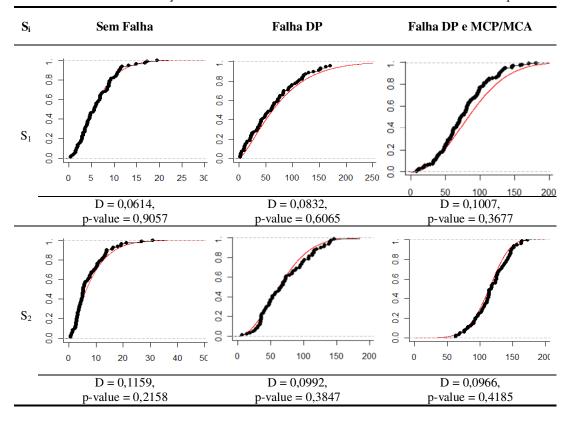


Tabela 6.4 Condição Ambiental I com FPSO Vazio - Aliviador Cheio e Alívio de Popa

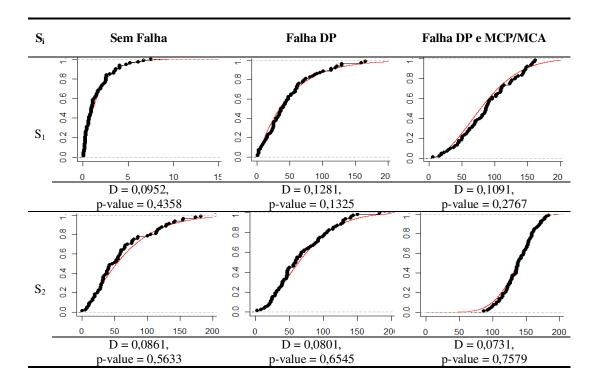


Tabela 6.5 Condição Ambiental II com FPSO Cheio - Aliviador Vazio e Alívio de Proa

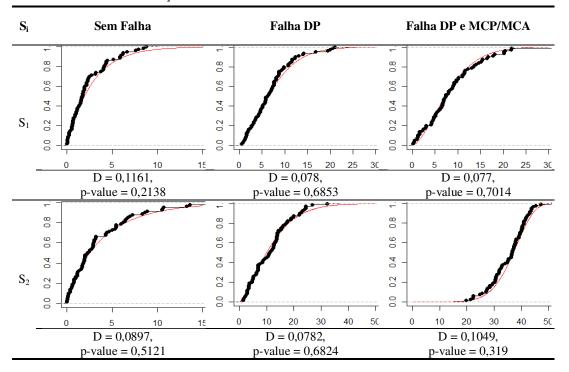


Tabela 6.6 Condição Ambiental II com FPSO Vazio - Aliviador Cheio e Alívio de Proa

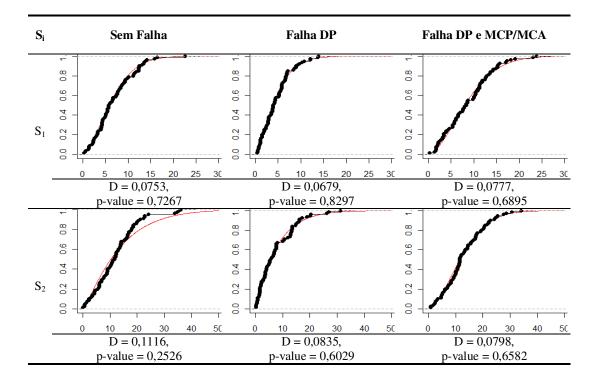
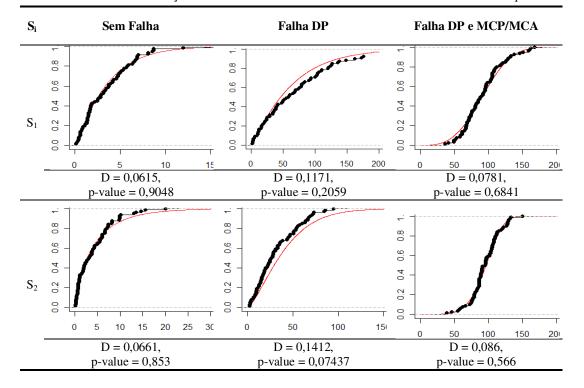


Tabela 6.7 Condição Ambiental II com FPSO Cheio - Aliviador Vazio e Alívio de Popa



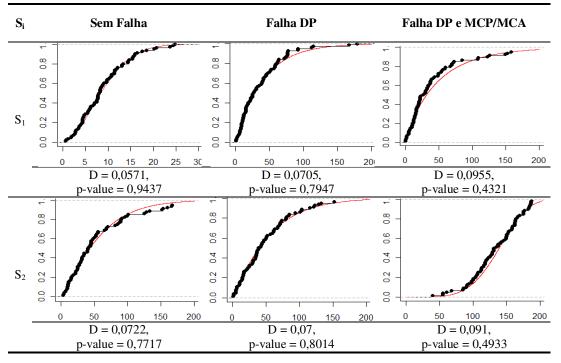


Tabela 6.8 Condição Ambiental II com FPSO Vazio - Aliviador Cheio e Alívio de Popa

Dos resultados das tabelas anteriores, pode-se verificar que o valor-p para todas as condições simuladas não permite rejeitar a hipótese nula a uma significância de 95%, o que permite concluir que as taxas de transição utilizadas para calcular a P(K|S<sub>12</sub>) foram adequadas. Estas taxas foram usadas como entradas no algoritmo recorrente que a seguir será validado.

## 6.3. VALIDAÇÃO DO ALGORITMO RECORRENTE

O algoritmo utilizado corresponde a uma discretização das taxas de transição para calcular a probabilidade do navio aliviador estar em um dos dois estados de operação possíveis. Para validar a eficiência do algoritmo é utilizado o fato de que a distribuição de Weibull com parâmetro  $\beta$ =1 é equivalente a uma distribuição exponencial. Desta forma, para os dois estados, as distribuições de Weibull com parâmetro  $\beta$ =1 serão comparadas com distribuições exponenciais. A distribuição exponencial servirá de controle já que a matriz de transição para esta distribuição é constante.

Para verificar a eficiência do algoritmo foi usado como exemplo sistema de abastecimento de combustível do MCP, e os parâmetros da distribuição exponencial foram selecionados usando a base de dados OREDA (2002). Para encontrar os parâmetros equivalentes entre a distribuição exponencial e a distribuição de Weibull foi utilizado o programa R (R Core,

2008) para gerar um conjunto de 1000 dados, com distribuição exponencial. Posteriormente, para este conjunto de dados, foram encontrados os parâmetros da distribuição de Weibull equivalente. Os parâmetros equivalentes são mostrados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 Parâmetros equivalentes para a validação

	Exponencial	Weibull
$S_1$	λ=28.5E-06	η=37158.87; β=1.0;
$S_2$	λ=45.4E-06	η=23449.61; β=1.0;

Usando o algoritmo mostrado no Apêndice E.3 foi avaliada eficiência do algoritmo, variando o tamanho do incremento, ( $\Delta t$ ). Os resultados são apresentados na Figura 6.1, para tamanhos do incremento de 5, 2, 1 e 0.1.

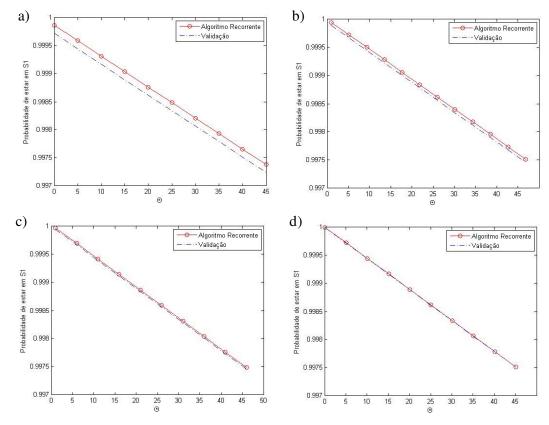


Figura 6.1 Probabilidade de estar em S1 a)  $\Delta t$ =5, b)  $\Delta t$ =2, c)  $\Delta t$ =1, d)  $\Delta t$ =0.1

Verifica-se que a eficiência do algoritmo aumenta de forma significativa quando o tamanho do incremento diminui. Para os cálculos apresentados no Capítulo 5, foi utilizado um incremento de 0.1 e como se observa na Figura 6.1, para este tamanho de incremento, o algoritmo se aproxima de forma significativa ao valor real.

### 6.4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA ANÁLISE DE DECISÃO

Na Análise de Decisão, o estudo da análise de sensibilidade é de suma importância para a análise de diferentes cenários. Uma vez obtida a solução ótima, variam-se alguns parâmetros para analisar o comportamento do modelo.

A seguir, são apresentados os resultados da análise preliminar da sensibilidade para a tomada de decisão, dada uma sequência acidental que corresponde ao primeiro modelo de decisão, cuja árvore é apresentada na Figura 5.35. Para realizar a análise, foi definido um intervalo para a escala de pontuação para x e construída uma função para relacionar as utilidades envolvidas em cada árvore de decisão. Posteriormente, é avaliada a sensibilidade da decisão para cada um dos três cenários de falha (sem falha, falha DP e falha DP e MCP) e para cada uma das duas condições ambientais e as duas condições de calado. Cada uma das árvores associadas aos três cenários tem quatro consequências. Estas foram organizadas em pares que fossem inversos aditivos, ou seja, um valor de pontuação alto em uma simultaneamente implica um valor de pontuação baixo na outra.

Assim, quando não existia evidência da ocorrência de falhas, foi estabelecida uma relação inversa aditiva entre as consequências: "Offloading com sucesso" e "Perde a possibilidade de ter o Offloading com sucesso", já que a primeira corresponde ao melhor cenário que pode acontecer enquanto a outra é o pior cenário, para este caso. As consequências: "Interromper a operação até as condições melhorarem" e "Decisão correta (condições desfavoráveis)" também são consideradas como opostos aditivos.

Quando existe a evidência de falha do DP o melhor cenário corresponde à consequência: "Decisão correta, evitou-se a desconexão de emergência" e o pior cenário tem como consequência: "Desconexão de emergência". As perdas intermediárias, porém inversas aditivas estão associadas com as consequências: "Offloading com sucesso" e "Perde a possibilidade de ter o Offloading com sucesso".

No caso de ocorrer a falha do DP e MCP, o pior cenário tem como consequência: "Possibilidade de colisão com impacto alto" e o melhor cenário, neste caso, é interromper a operação e o navio permanecer na zona de operação normal.

Os gráficos apresentados a seguir permitem observar o quanto os valores da pontuação afetam o comportamento da decisão, para cada um dos três cenários de falha (sem falha, falha DP e falha DP e MCP) e para cada uma das duas condições ambientais e as duas condições de calado.

As Figuras 6.2 e 6.3 apresentam o comportamento de decisão quando o sistema FPSOnavio aliviador está na condição ambiental I e o sistema de amarração é de proa.

Nas Figuras 6.2a e 6.3a pode-se verificar que quando não ocorrem falhas, as mudanças na pontuação para valorar a perda associada com as consequências: "Interromper a operação até as condições melhoram" e "Decisão correta (condições desfavoráveis)" não afetam o comportamento da decisão. Do mesmo modo, verifica-se que quando se analisa o comportamento da decisão para a perda associada com a consequência "Offloading com sucesso" entre 0 e 0.35, a decisão é de continuar com a operação; quando a perda associada é maior, a decisão muda, porém não faria muito sentido associar uma perda alta quando não existe evidência da ocorrência de falhas.

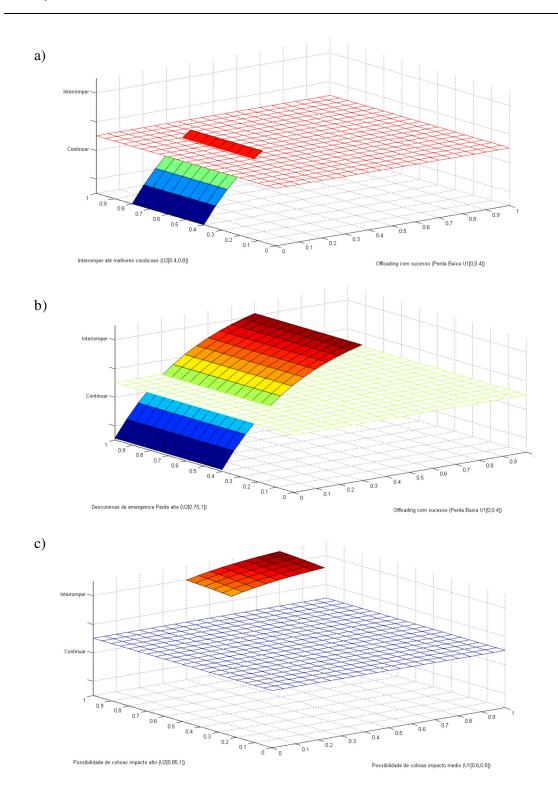


Figura 6.2 Comportamento da decisão pela variação da pontuação de *x* na condição IProaC1 a) Sem falha, b) Com falha do DP, c) Falha do DP e MCP

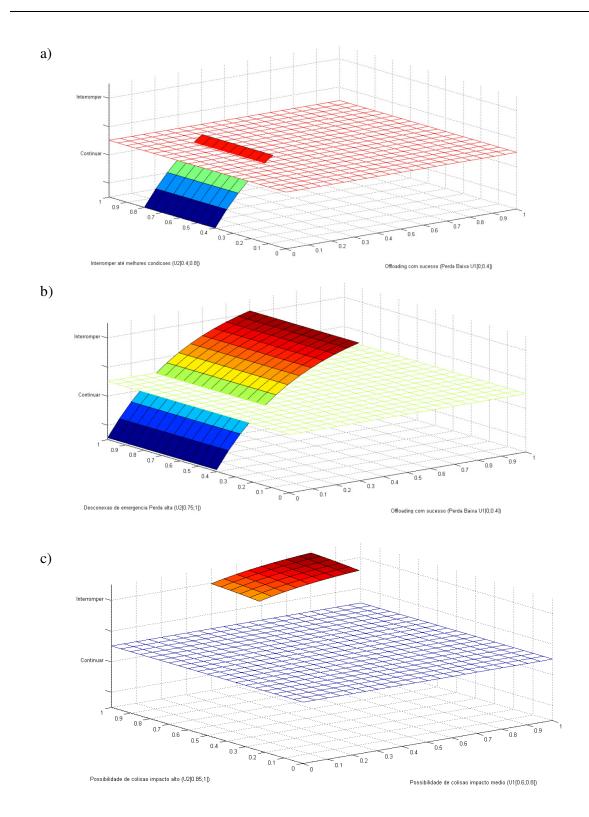


Figura 6.3 Comportamento da decisão pela variação da pontuação de *x* na condição IProaC2 a) Sem falha, b) Com falha do DP, c) Falha do DP e MCP

Quando o sistema FPSO-navio aliviador está na condição ambiental I e o sistema de amarração é de proa, também se observa que quando ocorre a falha do DP (Figura 6.2b e 6.3b), a decisão é muito sensível aos valores intermediários das perdas, portanto deve-se prestar especial atenção e este caso requer um aprofundado estudo para estimar os valores da pontuação.

De outro lado, nas Figuras 6.2c e 6.3c se observa que quando existe evidência de falhas do DP e MCP simultaneamente, o comportamento da decisão é estável, já que a inclinação do gráfico é pequena, ou seja, a decisão não é afetada pelos valores da pontuação, em nenhuma das quatro categorias de consequências.

As Figuras 6.4 e 6.5 apresentam o comportamento da decisão quando o sistema FPSOnavio aliviador está submetido à condição ambiental I e à amarração de popa. Neste caso, para as duas condições de amarração, pode-se verificar que quando existe evidência de que não ocorrem falhas bem como quando ocorrem falhas do DP e MCP simultaneamente, o comportamento da decisão é muito similar ao caso anterior.

À diferença de quando a amarração é de proa, quando a amarração é de popa e existe a evidência de falha do DP o comportamento da decisão é mais estável, como mostram as Figuras 6.4b e 6.5b. Quando a condição corresponde à condição ambiental I, amarração de popa, e o navio aliviador está vazio, pode-se concluir que para os valores de probabilidade resultantes das simulações, a decisão será interromper a operação sempre que exista evidência da falha do DP. Contudo, a solução é estável para pontuações das perdas referentes à desconexão de emergência maiores que 0,55.

Entretanto, quando não existe evidência de falhas, no caso quando o navio aliviador está cheio, a decisão se torna um pouco mais menos estável, e valores de pontuação associados às perdas do evento "Offloading com sucesso" maiores que 0,15 mudariam a decisão. Este comportamento é devido ao que se observou no Capítulo 5, o sistema amarração de popa, nas condições ambientais avaliadas, tem uma chance alta de sair da zona de operação normal, mesmo sem a presença de falhas.

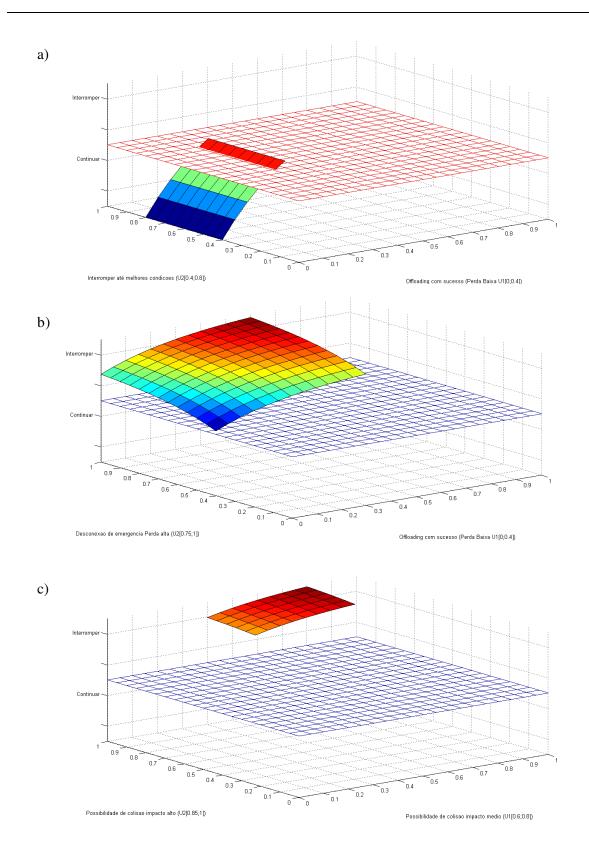


Figura 6.4 Comportamento da decisão pela variação da pontuação de *x* na condição IPopaC1 a) Sem falha, b) Com falha do DP, c) Falha do DP e MCP

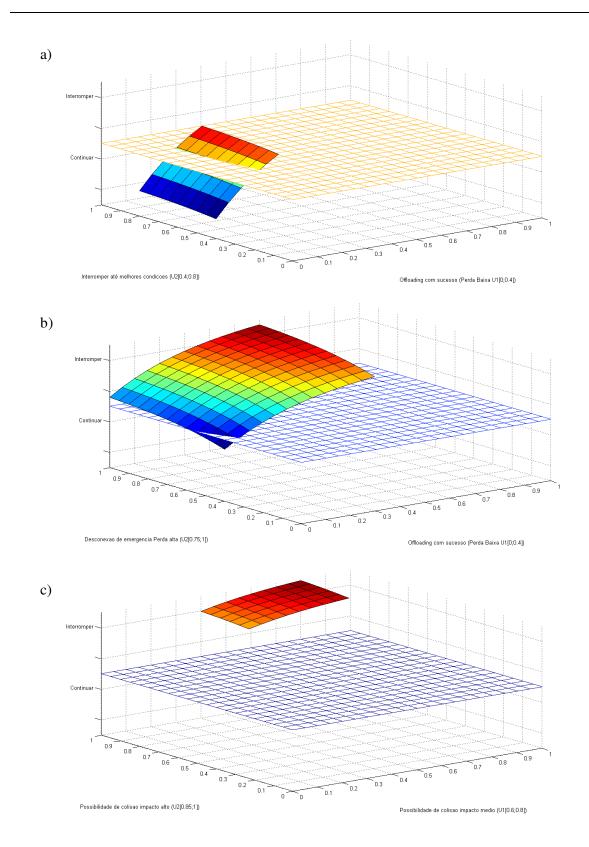


Figura 6.5 Comportamento da decisão pela variação da pontuação de *x* na condição IPopaC2 a) Sem falha, b) Com falha do DP, c) Falha do DP e MCP

Nas Figuras 6.6a e 6.7a pode-se verificar que quando não ocorrem falhas, as mudanças na pontuação para valorar a perda associada com as consequências: "Interromper a operação até as condições melhoram" e "Decisão correta (condições desfavoráveis)" não afeta o comportamento da decisão. Do mesmo modo, verifica-se que quando se analisa o comportamento da decisão para a perda associada com a consequência "Offloading com sucesso", entre 0 e 0,35, a decisão é de continuar com a operação e quando a perda associada é maior, a decisão muda. Nestes mesmos casos, observa-se que quando ocorre a falha do DP (Figura 6.6b e 6.7b), a decisão é muito sensível aos valores das perdas associadas com o offloading com sucesso e perder a possibilidade de finalizar o offloading que correspondem às perdas intermediárias, quando existe evidência da falha do DP. Portanto, deve-se prestar especial atenção e este caso requer um aprofundado estudo para estimar os valores da pontuação.

Nas Figuras 6.6c e 6.7c, pode-se observar que quando existe evidência de falha do DP e MCP o comportamento da decisão é estável, ou seja, para os valores de probabilidade resultantes das simulações, a decisão não é afetada pelos valores da pontuação.

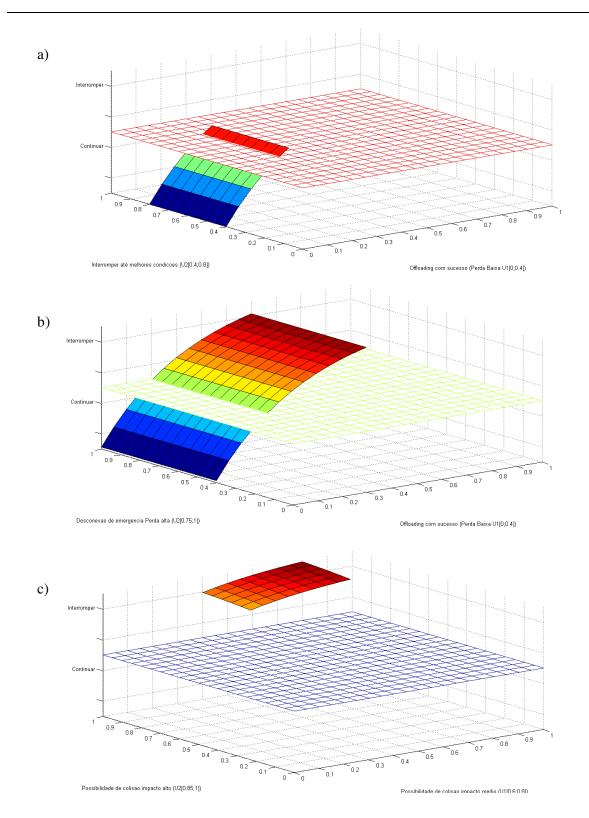


Figura 6.6 Comportamento da decisão pela variação da pontuação de *x* na condição IIProaC1 a) Sem falha, b) Com falha do DP, c) Falha do DP e MCP

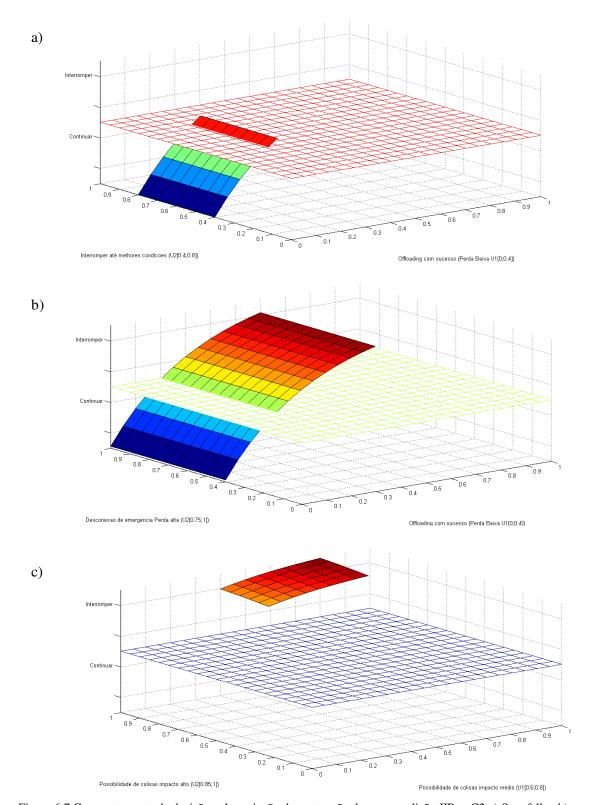
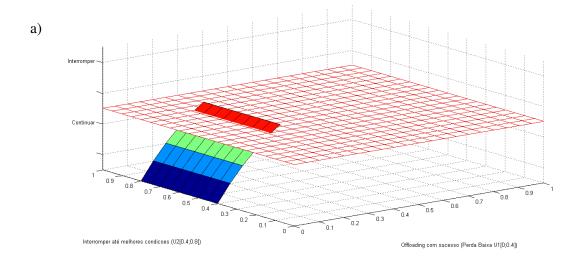
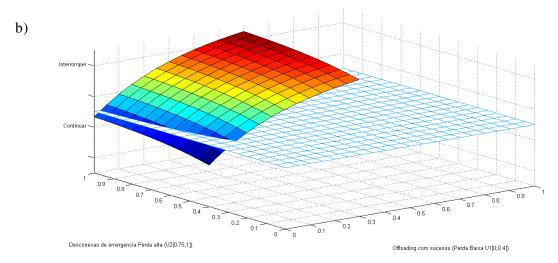


Figura 6.7 Comportamento da decisão pela variação da pontuação de *x* na condição IIProaC2 a) Sem falha, b) Com falha do DP, c) Falha do DP e MCP

As Figuras 6.8 e 6.9 apresentam o comportamento da decisão quando o sistema FPSO-navio aliviador está submetido à condição ambiental II e tipo de amarração de popa. Neste caso, para as duas condições de calado, pode-se verificar que quando existe evidência de que não ocorrem falhas ou ocorrem as falhas do DP e MCP simultaneamente, o comportamento da decisão é muito similar ao mesmo caso de amarração na condição ambiental I. Nestes casos, a decisão torna-se menos estável quando muda o estado de calado do navio aliviador, se a pontuação associada com as perdas para a consequência "Offloading com sucesso" não for muito baixa.





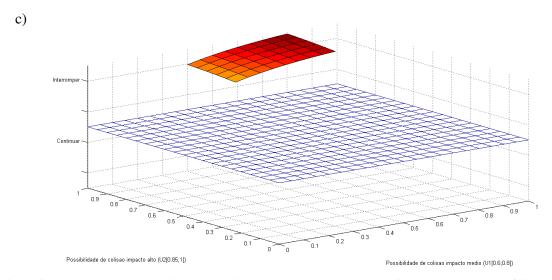


Figura 6.8 Comportamento da decisão pela variação da pontuação de *x* na condição IIPopaC1 a) Sem falha, b) Com falha do DP, c) Falha do DP e MCP

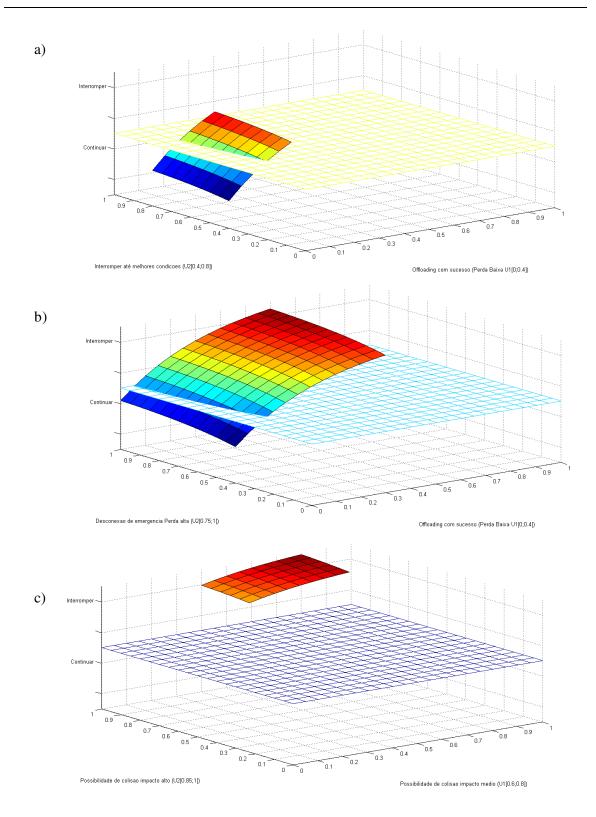


Figura 6.9 Comportamento da decisão pela variação da pontuação de *x* na condição IIPopaC2 a) Sem falha, b) Com falha do DP, c) Falha do DP e MCP

A análise de sensibilidade para a tomada de decisão sobre a interrupção ou continuação da operação de *offloading*, no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal (θ=45°), é um pouco diferente, já que, neste caso, têm-se onze consequências diferentes e, portanto, não foi possível estabelecer uma função que relacionasse os onze níveis de perda. Neste caso, foi seguido o procedimento proposto por Sendi e Clemen (1999), analisando cada nó de probabilidade de forma independente. Embora seja bem sabido que considerar isoladamente estes efeitos é uma limitação da análise de sensibilidade, esta análise permite observar o efeito que tem a interação entre o grupo de perdas e que estas tem sobre o nó de probabilidade.

Desta forma, para analisar o nó de probabilidade referente à possibilidade de continuar com a operação de offloading, foi definida a eq. (6.1) onde o valor do risco corresponde a z e cada um dos termos para definir esta equação corresponde a uma das consequências que aparece no ramo que está sendo considerado em cada caso.

$$z_{1jC} = (P(K_A) \cdot U_{1j} + P(K_B) \cdot U_2 + P(K_C) \cdot U_3) \cdot P(S_1)$$

$$z_{2jC} = [P(K_A|S_{12}) \cdot U_{4j} + P(K_B|S_{12}) \cdot U_5 + P(K_C|S_{12}) \cdot U_6] \cdot P(S_2)$$
(6.1)

Desta forma  $z_I$  representa o cálculo para o ramo apresentado na Figura 6.10. A variação na pontuação da perda para a consequência "Possibilidade de finalizar o Offloading", U<sub>2</sub>, estará representada no eixo x e a variação na pontuação da perda para a consequência "Possibilidade de colisão com impacto médio", U<sub>3</sub>, estará no eixo y dos gráficos apresentados na primeira linha das Figuras 6.12 a 6.19.

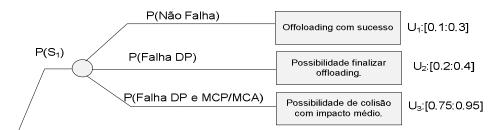


Figura 6.10 Ramo 1 da Árvore de Decisão continuar a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal

Desta forma  $z_2$ , representa o cálculo para o ramo apresentado na Figura 6.11. A variação na pontuação da perda para a consequência "Desconexão de emergência, abortar a operação",  $U_5$ , estará representada no eixo x e a variação na pontuação da perda para a consequência

"Possibilidade de colisão com impacto alto",  $U_6$ , estará no eixo y dos gráficos apresentados na segunda linha das Figuras 6.12 a 6.19.

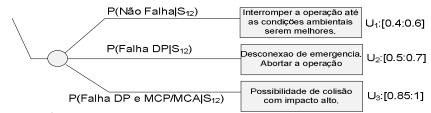


Figura 6.11 Ramo 2 da Árvore de Decisão continuar a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal

Ao comparar as Figuras 6.12a e 6.13a, pode-se verificar que, para valores baixos de pontuação da perda associada com a consequência "Offloading com sucesso", o nó de probabilidade apresenta menor variação quando o navio aliviador está vazio. Em termos gerais, pode-se dizer que nas duas condições de calado, o valor da probabilidade não apresenta variações quando se muda o valor de U<sub>3</sub>, devido ao fato de que a probabilidade associada é muito pequena. Além disso, verifica-se que o valor de probabilidade cresce quando aumenta a perda associada com o "Offloading com sucesso".

Ao comparar as Figuras 6.12b e 6.13b, pode-se verificar que no caso em que o navio aliviador esteja vazio, para valores de pontuação da perda associada com a consequência "Interromper a operação até que as condições melhorem" que estejam no começo do intervalo, a probabilidade não muda com a variação dos valores das utilidades U<sub>2</sub> e U<sub>3</sub>. No caso da operação de *offloading* estar na parte final, deve-se ser mais rigoroso na estimativa dos valores da perda. Porém, deve-se levar em consideração que para z<sub>2</sub>, os valores de probabilidade são muito pequenos.

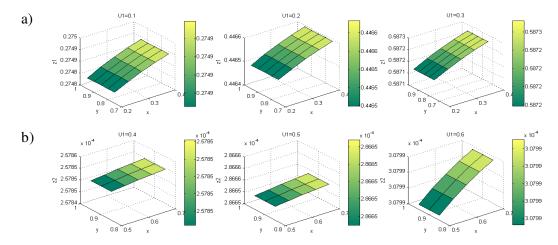


Figura 6.12 Análise de sensibilidade do ramo 1 para continuar a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IProaC1

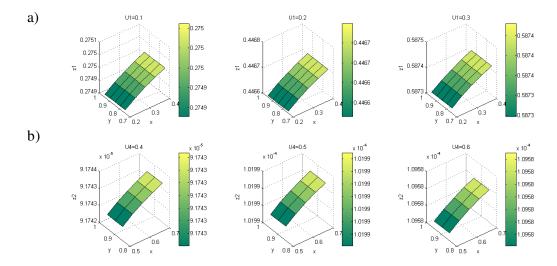


Figura 6.13 Análise de sensibilidade do ramo 1 para continuar a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IProaC2

No caso da condição ambiental I e tipo de amarração de popa mostradas nas Figuras 6.14 e 6.15, pode-se verificar que o valor de probabilidade também cresce quando aumenta a perda associada com o "Offloading com sucesso", porém, quando o navio aliviador está cheio, esta probabilidade cresce em menor quantidade. Em termos gerais, pode-se dizer que, nas duas condições de calado, o valor da probabilidade não apresenta variações quando se muda o valor de U<sub>3</sub> e U<sub>6</sub>, devido a fato de que a probabilidade associada é muito pequena e as variações são mais significativas quando se muda o valor de U<sub>2</sub> e U<sub>4</sub>. Portanto, deve-se prestar especial atenção às perdas associadas às consequências "Offloading pode ser finalizado com precaução" e "Desconexão de emergência, abortar a operação". Cabe notar que esta influência é menos acentuada quando U<sub>1</sub> é 0.2.

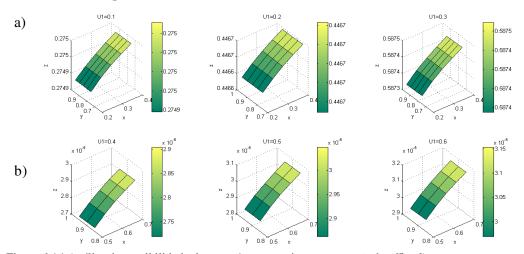


Figura 6.14 Análise de sensibilidade do ramo 1 para continuar a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IPopaC1

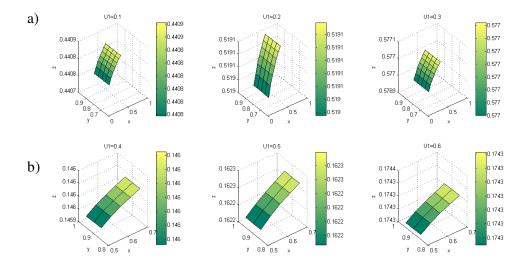


Figura 6.15 Análise de sensibilidade do ramo 1 para continuar a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IPopaC2

A análise de sensibilidade para a condição ambiental II é apresentada nas Figuras 6.16 a 6.19. Verifica-se que o comportamento é similar ao da condição ambiental I.

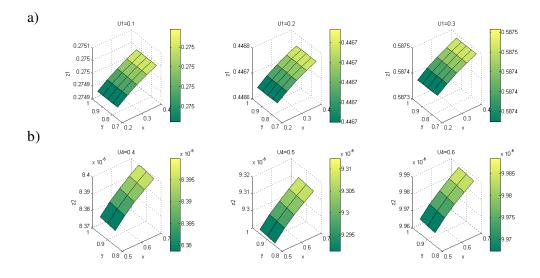


Figura 6.16 Análise de sensibilidade do ramo 1 para continuar a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IIProaC1

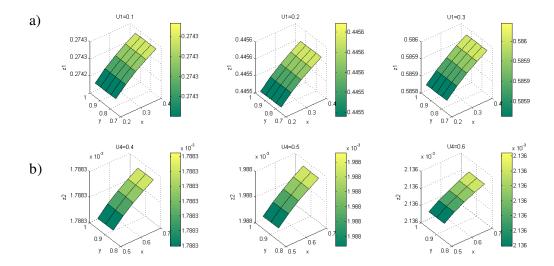


Figura 6.17 Análise de sensibilidade do ramo 1 para continuar a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IIProaC2

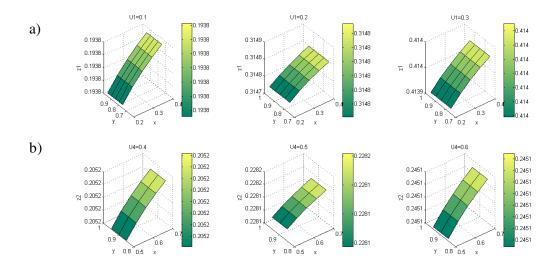


Figura 6.18 Análise de sensibilidade do ramo 1 para continuar a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IIPopaC1

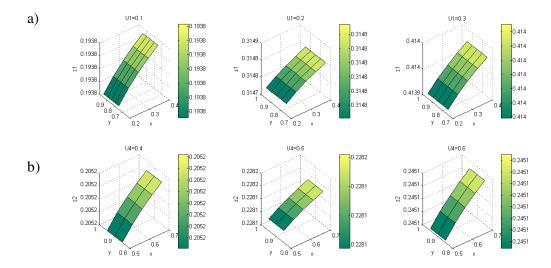


Figura 6.19 Análise de sensibilidade do ramo 1 para continuar a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IIPopaC2

Desta forma, para analisar o nó de probabilidade referente à possibilidade de interromper a operação de *offloading*, foi definida a eq. (6.2), onde o valor do risco corresponde a z e cada um dos termos para definir esta equação corresponde a uma das consequências que aparece no ramo que está sendo considerado em cada caso.

$$z_{1jl} = (P(K_A) \cdot U_{7j} + P(K_B) \cdot U_8 + P(K_C) \cdot U_9) \cdot P(S_1)$$

$$z_{2jl} = [P(K_A|S_{12}) \cdot U_{10j} + P(K_B|S_{12}) \cdot U_{11} + P(K_C|S_{12}) \cdot U_3] \cdot P(S_2)$$
(6.2)

Assim,  $z_I$  representa o cálculo para o ramo apresentado na Figura 6.20. A variação na pontuação da perda para a consequência "Perde possibilidade de finalizar o Offloading",  $U_8$ , estará representada no eixo x e a variação na pontuação da perda para a consequência "Possibilidade de colisão com impacto baixo",  $U_9$ , estará no eixo y dos gráficos apresentados na primeira linha das Figuras 6.22 a 6.29.

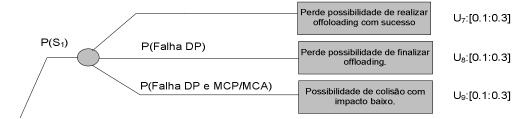


Figura 6.20 Ramo 1 da Árvore de Decisão para interromper a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal

Desta forma,  $z_2$  representa o cálculo para o ramo apresentado na Figura 6.21. A variação na pontuação da perda para a consequência "Evitou-se desconexão de emergência",  $U_{11}$  estará representada no eixo x e a variação na pontuação da perda para a consequência "Possibilidade de colisão com impacto médio",  $U_3$ , estará no eixo y dos gráficos apresentados na segunda linha das Figuras 6.22 a 6.29.

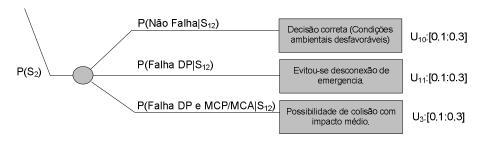


Figura 6.21 Ramo 2 da Árvore de Decisão para interromper a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal

Nas Figuras 6.22a e 6.23a, nas duas condições de calado, o valor da probabilidade não apresenta variações quando se muda o valor de U<sub>8</sub>, devido ao fato de que a probabilidade associada ser muito pequena. Além disso, verifica-se que o valor de probabilidade cresce quando aumenta a perda associada com o "Perde possibilidade de finalizar o Offloading". Ao comparar as Figuras 6.12 e 6.22, pode-se verificar que a probabilidade associada à perda é sempre maior para interromper a operação. Portanto, considerando que o objetivo é minimizar as perdas para as condições simuladas quando o sistema FPSO-navio aliviador está submetido à condição ambiental I e a amarração é de proa, a decisão é estável quando os valores da pontuação das utilidades variam.

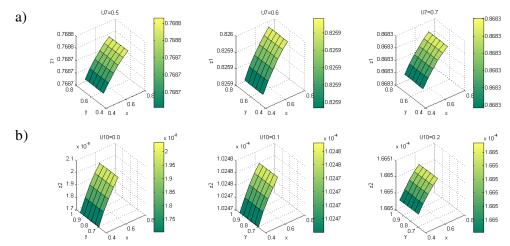


Figura 6.22 Análise de sensibilidade do ramo 1 para interromper a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IProaC1

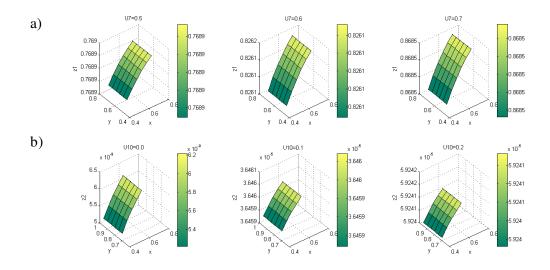


Figura 6.23 Análise de sensibilidade do ramo 1 para interromper a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IProaC2

No caso da condição ambiental II e tipo de amarração de popa mostradas nas Figuras 6.24 e 6.25, pode-se verificar o valor de probabilidade também cresce quando aumenta a perda associada com o "Perde possibilidade de finalizar o Offloading". Porém, quando o navio aliviador está cheio, esta probabilidade cresce em menor quantidade. Nestas duas condições de calado, o valor da probabilidade não apresenta variações quando se muda o valor de U<sub>9</sub>. Ao comparar as Figuras 6.14 e 6.24, pode-se verificar que a probabilidade associada à perda é sempre maior para interromper a operação. Portanto, considerando que o objetivo é minimizar as perdas para as condições simuladas quando o sistema FPSO-navio aliviador está submetido às condições ambientais I e a amarração é de proa, a decisão é estável quando os valores da pontuação das utilidades variam.

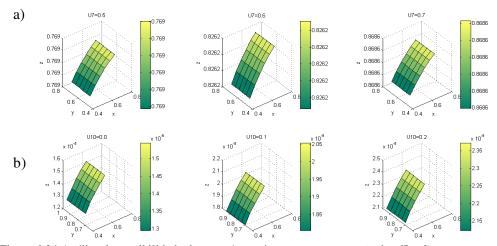


Figura 6.24 Análise de sensibilidade do ramo 1 para interromper a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IPopaC1

Ao comparar as Figuras 6.15 e 6.25, pode-se verificar que a probabilidade associada à perda nem sempre é maior para interromper a operação. Portanto, considerando que o objetivo é minimizar as perdas para as condições simuladas quando o sistema FPSO-navio aliviador está submetido à condição ambiental I e a amarração é de popa, a decisão depende do valor associado às perdas.

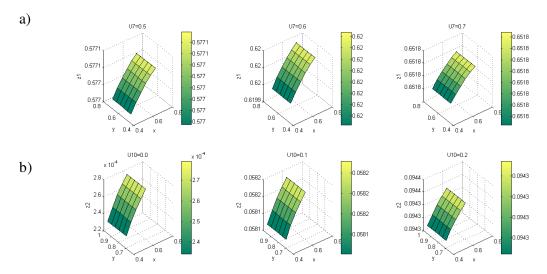


Figura 6.25 Análise de sensibilidade do ramo 1 para interromper a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IPopaC2

A análise de sensibilidade para a condição ambiental II é apresentada nas Figuras 6.26 a Figura 6.29. Verifica-se que o comportamento é similar ao da condição ambiental I, para interromper a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal.

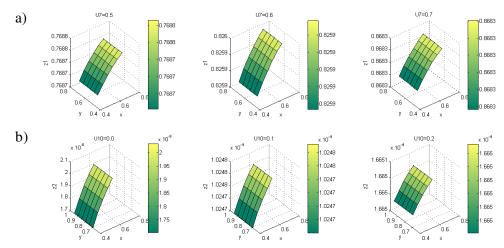


Figura 6.26 Análise de sensibilidade do ramo 1 para interromper a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IIProaC1

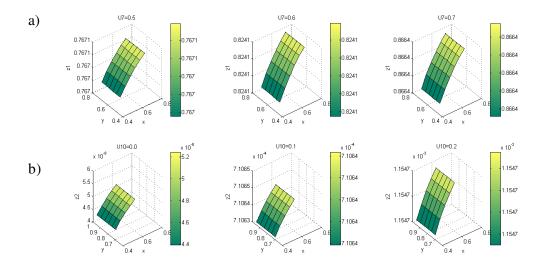


Figura 6.27 Análise de sensibilidade do ramo 1 para interromper a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IIProaC2

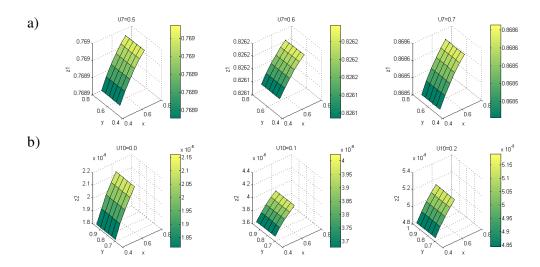


Figura 6.28 Análise de sensibilidade do ramo 1 para interromper a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IIPopaC1

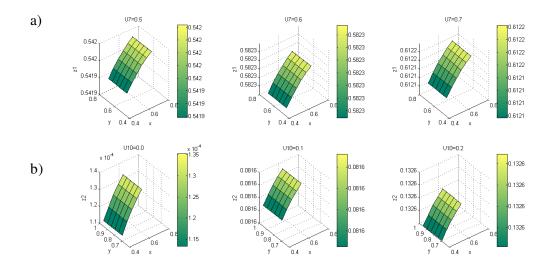


Figura 6.29 Análise de sensibilidade do ramo 1 para interromper a operação de *offloading* no momento em que o navio aliviador atinge o ângulo limite da zona de operação normal para IIPopaC2

## **6.5.** CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas gráficas são úteis para a análise do impacto das incertezas e observar o comportamento do perfil de risco. A análise de validação, neste caso, pode melhorar o processo de tomada de decisão ao focar a atenção nas variáveis de alto impacto e principalmente naquelas variáveis que podem ser controladas no decorrer da operação.

Os métodos matemáticos sugeridos para a análise de sensibilidade das probabilidades no caso de eventos aleatórios com maior número de estados da natureza mantêm a estrutura das árvores de decisão.

## CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O método desenvolvido nesta tese apresenta uma análise proativa para prevenir acidentes através da avaliação de risco, com o objetivo principal de identificar e descrever um sistema, a fim de reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas e minimizar as consequências dos eventos de perigos, no caso da ocorrência dos mesmos. Como resultados da análise, foram gerados cenários que permitem apoiar a mitigação das causas dos eventos de risco, assim como cenários de contingência para as consequências de eventos perigosos. Adicionalmente, o método proporciona auxílio para a tomada de decisão sobre mudanças na estratégia de operação no decorrer da operação.

O método proposto para a avaliação de risco é adequado para a mitigação do risco em operações de sistemas complexos (como os sistemas de escoamento de petróleo e transporte do mesmo em águas profundas), pois permite não só a identificação das consequências críticas, como também é uma ferramenta para a tomada de decisão, porque permite uma avaliação quantitativa da evolução de acidentes em sistemas cujas condições operacionais durante o tempo de operação podem mudar repentinamente.

O método utiliza a análise PHA que é uma ferramenta de análise de risco que apoia, de forma substancial, a identificação de eventos de perigo críticos. Esta permite visualizar o evento de perigo em duas direções simultaneamente e, portanto, permite visualizar ações mitigadoras, no caso dos eventos que originam o evento de perigo, e ações de contingência, no caso dos eventos originados a partir da ocorrência do evento de perigo.

O desenvolvimento das árvores funcionais, de falhas e de eventos é importante para a compreensão da relação funcional entre os componentes do sistema e sua relação com a progressão do acidente.

A estimativa bayesiana foi uma ferramenta útil para desenvolver uma distribuição posterior de um conjunto de parâmetros incertos que permite estimar a probabilidade de várias categorias de consequência, considerando as evidências de bancos de dados e conhecimento da operação, permitindo, assim, integrar esta análise com a tomada de decisões sob incerteza.

O método permite integrar, em um mesmo modelo, os resultados da análise bayesiana, análise de Markov e tomada de decisão potencializando cada uma destas ferramentas e ajudando na análise probabilística de risco em sistemas onde a mudança de estado torna-se um fator determinante na segurança do sistema. E finalmente conhecer o perfil de risco associado à operação específica.

A aplicação do método mostrou a inclusão da estrutura de análise funcional como ponto de partida para a análise de risco de sistemas complexos e como complemento à identificação dos sistemas a serem analisados. A árvore funcional permite criar uma estrutura funcional do sistema, que mapeia as relações entre os diversos componentes dentro do sistema. Permite também a identificação dos componentes críticos e assim a identificação dos potenciais riscos operacionais. A própria árvore funcional já fornece uma representação dos diversos cenários de operação.

A aplicação mostrou uma avaliação real do risco através do levantamento real das probabilidades de falhas relacionadas aos cenários de operação (baseado nos bancos de dados de operação e manutenção). Assim como, permitir a identificação de barreiras com a finalidade de garantir a segurança por meio da aplicação de uma inovadora combinação entre a informação específica da operação do sistema e a aplicação da análise de risco.

Ao analisar cada uma das etapas de uma operação complexa, como é o caso da operação de *offloading*, comprovou-se a efetividade da análise para encontrar os pontos vulneráveis e estabelecer as causas dos eventos de perigo, do mesmo modo que contribuiu para determinar as probabilidades das consequências que cada um destes tem.

Foram identificados e caracterizados os eventos de perigo com alto risco, os quais são: a falha do Motor de Combustão Auxiliar (MCA) do navio aliviador, a mudança de condições ambientais e a execução de manobras arriscadas, bem como a falha no sistema DP, o que permite aos operadores dar prioridade a estes sistemas na hora de programar estratégias de operação e manutenção.

Para o caso em análise, foi considerada a posição entre o FPSO e o navio aliviador, durante a operação de *offloading*, como a variável aleatória que está definida em dois estados operacionais: quando o navio aliviador está dentro da zona de operação normal e quando o navio aliviador sai desta zona, indicando a variação da posição do navio aliviador em relação ao FPSO devido às condições ambientais.

Com base na aplicação de inferência bayesiana e análise de processo Semi-Markov, o método permitiu estimar a probabilidade de que uma determinada sequência de acidente ocorra, tendo em vista que o navio aliviador está em uma determinada posição e, então, apoiar a tomada de decisão sobre mudar ou não a estratégia de operação.

Verificou-se que nas condições ambientais selecionadas, no caso de ocorrer qualquer sequência acidental, a probabilidade do navio aliviador ser empurrado para fora da área de operação normal é maior na consequência mais leve. Portanto, nestas condições, as ações de manutenção encaminhadas a evitar os eventos de perigo tornam-se fundamentais. Desta forma, evitando que a sequência acidental ocorra, o navio aliviador tem uma chance de maior de permanecer na zona de operação normal durante a operação de *offloading*.

A partir dos resultados, pode-se verificar que nas condições ambientais selecionadas, quando não é considerada a possibilidade de mudança de estado, a pior consequência tem pouca chance de acontecer e o cenário que se apresenta como o menos grave teria maior chance de acontecer. Assim que a mudança de estado entra como parte da análise, percebeu-se que, se o sistema passa a estar fora da zona normal de operação, existe uma probabilidade maior de que o navio aliviador fique sem propulsão com uma alta chance de colisão com alto impacto. Este resultado, junto com a análise de utilidade, torna-se uma ferramenta para a tomada de decisão já que finalmente o tomador de decisão saberá o risco de mudar ou não a estratégia de operação em função da análise probabilística.

Além disso, quando o navio aliviador muda da zona de operação normal para fora desta, as consequências menos graves são muito mais prováveis do que as consequências mais severas. Este é um resultado comum para todas as condições simuladas. Este resultado pode ser explicado devido a que a chance de que ocorra a falha do DP e MCP/MCA, durante a mesma operação, é remota. A partir dos resultados probabilísticos e de análise de decisão pode-se concluir que os casos quando o navio aliviador fica em uma condição onde este é empurrado contra o FPSO tornam-se crítico para a operação. A condição ambiental II resultou ser a condição mais crítica entre as duas condições analisadas.

Desta forma mostrou-se como a análise probabilística da sequência acidental, junto com a análise de custos, torna-se uma ferramenta para a tomada de decisão, já que finalmente o tomador de decisão saberá o risco de mudar ou não a estratégia de operação em função da análise probabilística.

A análise de sensibilidade e a validação do modelo permitem verificar as variações do perfil do risco que podem surgir da condição ambiental e operacional estudada, o que se torna em um ponto de partida para analisar estratégias de manutenção preventivas ou preditivas que permitam obter um perfil de risco adequado às exigências de segurança de operações em sistemas complexos.

Neste sentido propõem-se, como futuros trabalhos a implantação de uma estratégia de diagnóstico e manutenção que permitam obter perfis de risco adequados para operações de segurança crítica. Além disso, durante o desenvolvimento deste caso exemplo foi possível verificar que a aplicação deste método necessita de um conjunto de informações muito bem organizadas relativas não apenas aos aspectos de operação do sistema em análise, mas também aos aspectos de custos de operação e manutenção. O levantamento destas informações é bastante complexo e constitui-se em um desafio, e, portanto, sugerem-se para estudos futuros a criação de sistemas de monitoração que permita obter dados históricos sobre as frequências dos eventos de perigo e os custos associados a estes provenientes da operação real do sistema, para obter resultados que possam ser validados com os dados específicos da operação.

Para o desenvolvimento da tese foram selecionadas oito condições operacionais, consideradas como frequentes na Bacia de Campos, e verificou-se o efeito das condições ambientais sobre o perfil do risco da operação de *offloading*, entretanto, dependendo da condição ambiental e operacional deve-se realizar um novo perfil de risco. Neste sentido, recomenda-se como trabalhos futuros a análise de outros cenários de operação e condições ambientais para conhecer a chance de uma sequência acidental acontecer dado um cenário de operação, bem como a aplicação do modelo, a outros sistemas complexos adaptando-o às particularidades do estudo de caso.

- ABS. Risk Assessment Applications for the Marine and Offshore Oil and Gas Industries.

  Manual Guia, New York: American Bureau of Shipping, 2000.
- ADMYAN, A., e D. HE. "Analysis of Sequenial Failures for Assessment of Reliability and Safety of Manufacturing Systems." *Reliability Engineering and System Safety* 76 (2002): 227-236.
- AGUIAR, L. A. *Metodologia de Análise de Riscos APP & HAZOP*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Programa de Engenharia Nuclear, 2008.
- ALBERT, J. Bayesian Computation with R. London: Springer, 2007.
- ALE, B. J. M. "Risk Assessment practices in The Netherlands." *Safety Science* 40 (2002): 105-126.
- ANDREWS, J. D., e L. M. RIDLEY. "Reliability of Sequential Systems Using the Cause-consequence Diagram Method." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* 215 (2001): 207-220.
- ARUNRAJ, N. S., e J. MAITI. "Risk-Based Maintenance: Tecniques and Applications." *Jornal of Hazardous Materils* 142, 2007: 653-661.
- ATWOOK, C. L. "Constrained Non-Informative Priors in Risk Assessment." *Reliability Engineering and System Safety* 53 (1996): 37-46.
- AVEN, T., e J. KORTE. "On the Use of Risk and Decision Analysis to Support Decision-Making." *Reliability Engineering & System Safety*, 2003: 289-299.
- AVEN, T., e J. T. KVALOY. "Implementing the Bayesian Paradigm in Risk Analysis." Reliability Engineering and System Safety 78 (2002): 195-201.
- AVEN, T., S. SKLET, e J. E. VINNEM. "Barrier and Operational Risk Analysis (BORA) of Hydrocarbon Releases." *Journal of Hazardous Materials* 137 (2006): 681-691.
- BAHR, NICHOLAS J. System Safety Engineering and Risk Assessment. New York: Taylor and Francis, 1997.

BARBOSA, W. S. Análise Probabilística de Riscos Via Redes Bayesianas: Uma Aplicação na Construção de Poços Multilaterais. Dissertação de Mestrado, Recife: Universidad Ferderal de Pernambuco, 2005.

- BARROS, P. F. Uma Metodologia para Análise de Disponibilidad de Sistemas Complexos via Hibridismo de Redes Bayesianas e Processo Markovianos. Dissetação de Mestrado, Recife: UFPE, 2006.
- BEARD, A. "Some Ideas on a Systemic." Fire Safety Journal 14, n. 3 (1989): 193-197.
- BECKER, G., L. CAMARINOPOULOS, e G. ZIOUTAS. "A Sem-Markovian Model Allowing for Inhomognities with Respect to Process Time." *Reliability Engineering and System Safety* 70 (2000): 41-48.
- BEKMAN, O. O., e P. L. COSTA NETO. *Análise Estatística da Decisão*. São Paulo: Edgrad Blucher, 2002.
- BERNARDO, J. M., e A. F. SMITH. Bayesian Theory. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.
- BLANCHARD, B. S., e W. J. FABRYCKY. *Systems Engineering and Analysis*. Boston: Prentice Hall, 2011.
- BOBBIO, A., L. PORTINALE, M. MINICHINO, e E. CIANCAMELA. "Improving the Analysis of Dependable Systems by Mapping Fault Trees into Bayesian Networks." *Reliability Engineering and System Safety* 71, n. 3 (2001): 249-260.
- BORGONOVO, E., e G. E. APOSTOLAKIS. "A New Importance Measure for Risk-Informed Decision Making." *Reliability Engineering and System Safety* 72 (2001): 193-212.
- CAMBACEDES, L., e M. BOUISSOUS. "Modeling Safety and Security Interdependencies with BDMP." *IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics* (SMC). Istanbul: IEEE, 2010. 2852-2861.
- CARAZAS, F. G. Análise de Disponibilidade de Turbinas a Gás Empregadas em Ciclo Combinado. São Paulo: Escola Politécnica de USP, 2006.
- CARAZAS, F. J. G., e G. F. M. SOUZA. "Risk-Based Decision Making Method for Maintenance Policy Selection of Thermal Power Plant Equipment." *Energy* 35 (2010): 964-975.
- CARDOSO, I. A. Desenvolvimento de Método para Seleção de Políticas de Manuntenção Baseado em Análise de Ricso. Sao Paulo Brasil: Tese de Doutorado, 2004.

CASAL, J. Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants. Amsterdam: Elsevier, 2008.

- CATALYUREK, U., B. RUTT, K. METZROTH, e A. HAKARBYAN. "Development of a Code-diagnostic Computational Infrastructure for the Dynamic Generation of Accident Progression Event Trees." *Reliability Engineering and System Safety* 95 (2010): 278-294.
- CELIK, M. "Managing the Operational Constraints in Ship Machinery Design and Installation: Synthesis of Design-Based Failures for Improving the Structural Quality of Shipboard Systems." *Naval Engineers Journal* 120, n. 3 (2008): 67-76.
- CETESB. "Gerenciamento do Risco: Panorama Geral: Breve Histórico sobre Vazamento do Óleo no Mar no Mundo, Causas-consequencias." *Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.* 2002. www.cetesb.sp.gov.br (acesso em 25 de Feb. de 2008).
- CHEN, C.- H., S. F. LING, e W. CHEN. "Project Scheduling for Collaborative Product Development using DSM." *International Journal of Project Management* 21 (2003): 291-299.
- CHEN, H. Probabilistic Evaluation of FPSO-Tanker Collision in Tandem Offloading Operation. Tese de Doutorado, Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2003.
- CHEN, H., e T. MOAN. "Probabilistic Modeling and Evaluation of Collision between Shuttle Tanker and FPSO in Tadem Offloading." *Reliability Engineering and System Safety* 84 (2004): 169-186.
- CHEN, S. M. "Fuzzy System Reliability Analysis Using Fuzzy Number Arithmetic Operations." *Fuzzy Sets and Systems* 64 (1994): 31-38.
- CHENG, S. R., L. BINSHAN, B. M. HSU, e M. H. SHU. "Fault-Tree Analysis for Liquefied Natural Gas Terminal Emergency Shutdown System." *Expert Systems with Applications* 36, n. 9 (2009): 11918-11924.
- CHEOK, M. C., G. W. PARRY, e R. R. SHERRY. "Use of Importance Measures in Risk-Informed Regulatory Applications." *Reliability Engineering and System Safety* 60 (1998): 213-226.
- CHIN, K.-S., D.-W. TANG, J.-B. YANG, S. Y. WONG, e H. WANG. "Assessing New Product Development Project Risk by Bayesian Network with a Systematic

Probability Generation Methodology." *Expert System with Applications* 36 (2009): 9879-9890.

- CHRISTENSEN, R., W. JOHNSON, A. BRANSCUM, e T. E. HANSON. *Bayesian Ideas and Data Analysis*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2010.
- CICILIA, B. F. *Criteiro de Projeto Baseado em Confiabilidade para o Sistema de Tendões de uma TLP*. Rio de Janeiro: Universidade Ferderal de Rio de Janeiro, 2004.
- COJAZZI, G. "The DYLAM Approach for the Dynamic Reliability Analysis of System." Reliability Engineering and System Safety 52 (1996): 279-296.
- COOPETROLEO. *Aguas Profundas*. 12 de 08 de 2004. www.coopetroleo.com.br/art.htm (acesso em 06 de 05 de 2008).
- CORREA, S. H., et al. "Análise Preliminar de Perigos na Operação de Alívio Usando Aliviadores Convencionais e com Posicionamento Dinâmico." *Rio Oil and Gas Expo and Conference*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2006. 1-8.
- COWING, M. M., M. E. PATE-CORNELL, e P. W. GLYNN. "Dynamic modeling of the Tradeoff between Productivity and Safety in Critical Engineering Systems." Reliability Engineering and System Safety 86 (2004): 269-284.
- CRAWLEY, F. K., e M. M. GRANT. "Concept Risk Assessment of Offshore Hydrocarbon Production Installations." *Process Safety and Environmental Protection* 75B (1997): 157-163.
- DANILOVIC, M., e T. R. BROWNING. "Managing Complex Product Development Projects with Design Structure Matrices and Domain Mapping Matrices." *International Journal of Project Management* 25 (2007): 300-314.
- DE LEON, D., e C. ORTEGA. "Calculation of Indirect Losses for the Risk Analysis of an Offshore Oil Complex in Mexico." *Proceedings of the 23rd OMAE Conference*. Vancuver: OMAE, 2004. 307-312.
- DEKKER, S., P. CILLIERS, e J.-H. HOFMEVR. "The Complexity of Failure: Implications of Complexity Theory for Safety Investigations." *Safety Science*, 2011: 939 945.
- DISTEFANO, S., e A. PULIAFITO. "Reliability and Avalilability Analysis of Dependent-Dynamic Systems with DRBDs." *Reliability Engineering and System Safety* 94 (2009): 1381-1393.

DOYTCHIN, E., e G. SZWILLUS. "Combining Task Analysis and Fault Tree Analysis for Accident and Incident Analysis: A Case Study from Bulgaria." *Accident analysis and Prevention*, 2009: 1172-1179.

- DROGUETT, E. L., F. J. GROEN, e A. MOSLEH. "Bayesian Assessment of the Variability of Reliability Measures." *Pesquisa Operacional* 26 (2006): 109-127.
- DUJIM, N. J. "Safety-Barrier Diagrams as a Safety Management Tool." *Reliability Engineering and System Safety* 94 (2009): 332-341.
- DUNJO, J., V. FTHENAKIS, J. VILCHEZ, e J. ARNALDOS. "Hazard and Operability (HAZOP) Analysis. A Literature Review." *Journal of Hazardous Materials* 173 (2010): 19-32.
- EHLERS, R. S. Introdução a Inferência Bayesiana. UFPR, 2003.
- EJLALI, A., e S. G. MIREMADI. "FPGA-Based Monte Carlo Simulation for Fault Tree Analysis." *Microelectronics Reliability* 44, n. 6 (2004): 1017-1028.
- ELEYE-DATUBO, A. G., A. WALL, A. SAAJEDI, e J. WANG. "Enabiling a Powerful Marine and Offshore Decision-Support Solution through Bayesian Network Technique." *Risk Analysis* 26, n. 3 (2006): 695-721.
- ERICSON, CLIFTON A. *Hazard Analysis Techniques for System Safety*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- FALCK, A., E. SKRAMSTAD, e M. BERG. "Use of QRA for Decision Support in the design of an Offshore Oil Production Installation." *Journal of Hazardous Materials* 71 (2000): 179-172.
- FERDOUS, R., F. KHAN, P. AMYOTTE, e B. VEITCH. "Methodology for Computer Aided Fault Tree Analysis." *Process Safety and Environmental Protection* 85 (2007): 70-80.
- FERDOUS, R., F. KHAN, R. SADIQ, P. AMYOTTE, e B. VEITCH. "Handling Data Uncertainties in Event Tree Analysis." *Process Safety and Environmental Protection* 87 (2009): 283-292.
- FERNANDEZ, M. "Acidentes Ambientais nas Plataformas." *Gestão de Risco* 56 (2010): 6-20.
- FORTUNE, J. Learning from Failure: The Systems approach. New York: Wiley, 1995.

FROHWEIN, H. I., J. H. LAMBERT, e Y. Y. HAIMES. "Alternative Measures of Risk of Extreme Events in Decision Trees." *Reliability Engineering and System Safety* 66 (1999): 69-84.

- GHOSH, J. K., M. DELAMPADY, e T. SAMANTA. *An Introduction to Bayesian Analysis*. New York: Springer, 2006.
- GILBERT, R. B., E. G. WARD, e A. J. WOLFORD. *Compartive Risk Analysis for Deepwater Production System*. Final Project Report, Texas: Offshore Technology Research Center, 2001.
- GOOSSENS, L. H. J., e R. M. COOKE. "Applications of some Risk Assessment Techniques: Formal Expert Judgement and Accident Sequence Precursors." *Safety Science* 26 (1997): 35-47.
- GRANT, I., e C. COOMBS. *Handbook of Reliability Engineering and Management*. New York: McGraw Hill, 1996.
- GRAY, J. N., e I. F. MACDONALD. "Safety Study of Part of a Dynamic Positioning System for a Diving-Support Ship." *Reliability Engineering* 3 (1982): 179-192.
- GUILLERM, R., e H. DEMMOUN. "Engineering Dependability Requirements for Complex System." *Systems Conference*. San Diego: IEEE, 2010. 149-152.
- HAIMMES, Y. *Risk Modeling Assessment and Management*. New York: John Wiley and Sons, 1998.
- HALS, T. "New Methods for DP Assisted Tandem Loading." *Dynamic Positioning Conferece.* Houston: Marine Technology Society, 1999. 1-8.
- HATTON, L. Developing Software for in High-Integrity and Safety-Critical Systems. New York: McGraw-Hill, 1995.
- HAUPTMANNS, U. "Semi-Quantitative Fault Tree Analysis for Process Plant Safety Using Frequency and Probability Range." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 17, n. 5 (2004): 339-345.
- HEIDENBERGER, K. "Dynamic Project Selection and Funding under Risk: A Decision Tree based MILP Approach." *European Journal of Operational Research* 95 (1996): 284-298.
- HELGOY, K. E. "State of DP Development and Potential in Shuttle Tankers." *Dynamic Positioning Conference*. Houston: Marine Technology Society, 2003. 1-18.

HIDEKI, F. O. *Inferencia Bayesiana para o Tamanho de uma População Fechada com Erros de Registro de Dados Amostrais*. Dissertação de Mestrado, São Carlos: UFSC, 2008.

- HILLIER, G., e J. LIEBERMAN. *Introduction to Operations Research*. New York: McGraw-Hill, 1995.
- HSE. Marine Risk Assessment Technology. Report 2001/063, HSE books, 2002, 1-14.
- HSE. Shuttle Tanker and Offloading Operations at FPSO/FSU's. Offshore Tecnology Report, Bootle: HSE, 1999.
- HU, J., L. ZHANG, e Z. WANG. "Quantitative HAZOP Analysis for Gas Turbine Compressor based on Fuzzy Information Fusion." *Systems Engineering Theory & Practice* 29 (2009): 153-159.
- HU, S., Q. FANG, H. XIA, e Y. XI. "Formal Safety Assessment based on Relative Risk Model in Ship Navigation." *Reliability Engineering and System Safety* 92 (2007): 369-377.
- IMCA. "Offshore Survey Division Publications International Marine Contractors Association." *International Marine Contractors Association*. 1999. (acesso em 2009).
- IMO. "Guidelines for Vessels with Dynamic Positioning System." 1994.
- —. "Maritime Security." *International Maritime Organization*. 2004. www.imo.org (acesso em 28 de April de 2008).
- JUN, C.-H., S. Y. CHANG, Y. HONG, e H. YANG. "A Bayesian Approach to Prediction of System Failure Rates by Criticalities under Event Trees." *International Journal Production Economics* 60-61 (1999): 623-628.
- KALANTARNIA, M., F. KHAN, e K. HAWBOLDT. "Dynamic Risk Assessment Using Failure Assessment and Bayesian Theory." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22 (2009): 600-606.
- KAPLAN, S. "On the Inlcusion of Precursor and Near Miss Events in Quantitative Risk Assessments: A Bayesian Point of View and a Space Shuttle Example." *Reliability Engineering and System Safety* 27 (1990): 109-115.
- KELLER, W., e M. MODARRES. "A Historical Overview of Probabilistic Risk Assessment Development its Use in the Nuclear Power Industry: A Tribute to the Late Professor Norman Carl Rasmussen." *Reliability Engineering and System Safety* 89 (2005): 271-285.

KHAN, F., e S. ABBASI. "Mathematical Model for HAZOP Study Time Estimation." Journal of Loss Prevention in the Process Industries 10 (1997): 249-257.

- KONTOVAS, C., e H. PSARAFTINS. "Formal Safety Assessment: A Critical Review." *Marine Technology* 46, n. 1 (2009): 45-59.
- KORAYEM, M. H., e A. IRAVANI. "Improvement of 3P and 6R Mechanical Robots Reliability and Quality Applying FMEA and QFD Approaches." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 24 (2008): 472-487.
- KRISHNASAMY, L., F. I. KHAN, e M., M. HADDARA. "Development of a Risk-Based Maintenance (RBM) for a Power-Generating Plant." *Jornal of Loss Prevention in the process industries* 18, 2005: 69-81.
- KUMAMOTO, H., e E. HENLEY. *Probabilistic Risk Assessment and Mangement for Engineers and Scientists.* New York: IEEE Press, 1996.
- LEE, F. P. Loss prevention in the Process Industries. Vol. 3. Oxford: Butterworth Heinemann, 1988.
- —. Loss Prevention in the Process Industries. Vol. 3. Oxford: Butterworth Heinemann, 1996.
- LEE, J., I. YEO, e Y. YANG. "A Trial Application of FSA Methodology to the Hatchway Waterting Integrity of Bulk Carriers." *Marine Structures* 14 (2001): 651-667.
- LEITCH, R. D. *Reliability Analysis for Engineers, an Introduction*. New York: Oxford University Press, 1995.
- LEITE, M. S. *Proposta de uma Modelagem de Referência para Representar Sistemas Complexos*. Tese de Doutorado, Florianopolis: UFSC, 2004.
- LEVESON, N. "A New Accident Model for Engineering Safety Systems." *Safety Science* 2, n. 4 (2004): 237-270.
- LEWIS, E. E. Introduction to Reliability Engineering. New York: Wiley & Sons, 1987.
- LIMNIOS, N. "Dependability Analysis of Semi-Markov Systems." *Reliability Engineering* and Safety system 55 (1997): 203-207.
- LINDHE, A., L. ROSÉN, T. NORBERG, e O. BERGSTEDT. "Fault Tree Analysis for Integrated and Probabilistic Risk Analysis of Drinking Water Systems." *Water Research*, 2009: 1641-1653.
- LINDLEY, D. V. *Introduction to Probability and Statistics : from a Bayesian Viewpoint.*Cambridge: Cambridge University Press, 1965.

LONG, W., Y. SATO, e M. HORIGOME. "Quantification of Sequential Failure Logic for Fault Tree Analysis." *Reliability Engineering and System Safety* 67, n. 3 (2000): 269-274.

- LOPES-MACHADO, P. J. Avalição da Confiança no Funcionamento de Redes de Campo. Dissertação de Mestrado, Porto: Universidade do Porto, 2004.
- MAHADEVAN, S., R. ZHANG, e N. SMITH. "Bayesian Networks for System Reliability Reassessment." *Structural Safety* 23 (2001): 231-251.
- MAJID, H., e W. WANG. "Reliability Data Analysis and Modeling of Offshores Oil Platform Plant." *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 16, n. 4 (2000): 287-295.
- MAN. "Marine Engine." 2009. http://www.manbw.com/files/news/filesof1415/19993762.pdf (acesso em 2009).
- MARITZ, J. S., e T. LWIN. Emprical Bayes Methods. London: Chapman and Hall, 1989.
- MCGA. "Ship and Cargoes." *Maritime and Coastguard Agency*. 2005. http://www.mcga.gov.uk/c4mca/stscontingencyplan291105.pdf (acesso em 2008).
- MEEL, A., e W. D. SEIDER. "Plant-specific Dynamic Failure Assessment Using Bayesian Theory." *Chemical Engineering Science* 61 (2006): 7036-7056.
- MIGON, H. S., e H. F. LOPES. *Analise Bayesiana de Decisões: Aspecto Práticos*. São Paulo: ABE, 2002.
- MILLAN, J., e S. O'YOUNG. "Hybrid System Modeling of Tandem Dynamically-Positoned Vessels." *Proceedings of the 39 IEEE Conference on Decision and Control.* Sydney, Australia, 2000. 3157-3158.
- MODARRES, M. What Every Engineer Should Know About: Reliability and Risk Analysis. New York: Marcel Dekker, 1993.
- MODARRES, M., e S. W. CHEON. "Function-Centered Modeling of Engineering Systems using the Goal Tree–Success Tree Technique and Functional Primitives." *Reliability Engineering and System Safety* 64 (1999): 181-200.
- MON, D. L., e C. H. CHENG. "Fuzzy System Reliability Analysis for Components with Different Membership Functions." *Fuzzy Sets and Systems* 64 (1994): 145-157.
- MONTANI, S., L. PORTINALE, D. BOBBIO, e D. CODETTA-RAITERI. "RADYBAN: A Tool for Reliability analysis of Dynamic Fault Tree through Conversion into Dynamic Bayesian Networks." *Reliability Engineering and System Safety* 93 (2008): 922-932.

MOORE, J. H., e L. R. WEATHERFORD. *Tomada de Decisão em Administração*. Porto Alegre: Bookman, 2005.

- MORATELLI, L. J. *Principais Fatores do Projeto de Navios Aliviadores com Sistema de Posicionamento Dinâmico*. Dissertacao de Mestrado, Sao Paulo: Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo, 2010.
- MOURA, M. C., e E. L. DROGUETT. "A Continuous-Times Semi-Markov Bayesian Belief Network Model for Avaliability Measure Estimation of Fault Tolerant Systems." *Pesquisa Operational* 28, n. 2 (2008): 355-375.
- NIVOLIANITOU, Z., A. AMENDOLA, e G. REINA. "Reliability Analysis of Chemical Processes by DYLAM Approach." *Reliability Engineering* 14 (1986): 163-182.
- NPRD. Nonelectronic Parts Reliability Data. Rome: Reliability Analysis Center, 1995.
- OLDENHOF, M. T., et al. "Consistency of FMEA Used in the Validation of Analytical Procedures." *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* 54 (2011): 592-595.
- ONGARO, E., et al. "Developing an Event Tree for Probabilistic Hazard and Risk Assessment at Vesuvius." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 178 (2008): 397-415.
- ONIP. *Programa Nacional de Mobilização da Indústria Nacional do Petróleo e Gás Natural.* 01 de 11 de 2002. www.onip.org.br (acesso em 25 de 05 de 2008).
- OREDA. Offshore Reliability Data Handbook. Norway: OREDA Participants, 2002.
- OUHBI, B., e N. LIMNIOS. "Reliability Estimation of Semi-Markov Systems: A Case Study." *Reliabilty Engineering and system safety* 58 (1997): 201-204.
- PALACIOS, J., C. E. P. RODRIGUEZ, G. F. M. SOUZA, e F. J. G. CARAZAS. "Application of Markovian Processess for the Risk-Based Decision Making." *Proceedings: International Conference on Computers and Industrial Engineering-CIE* 39, 2009: 1279-1284.
- PAPAZOGLOU, L. A., e O. N. ANEZIRIS. "Master Logic Diagram: Method for Hazard and Initiating Event Identification in Process Plants." *Journal of Hazardous Materials* 97 (2003): 11-30.
- PARHIZI, S., J. SHAHRABI, e M. PARIAZAR. "A New Accident Investigation Approach based on Data Mining Techniques." *Journal of Applied Sciences* 9, n. 4 (2009): 731-737.

PERES, L. F. Metodologia para Gerenciamento de Risco: Foco na Segurança e na Continuidade. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

- PERMAN, M., A. SENEGACNIK, e M. TUMA. "Semi-Markov Models with an Application to Power-Plant Reliability Analysis." *IEEE Transactions on Reliability* 46, n. 4 (1997): 526-532.
- PHILIPSON, L. L., e P. D. WILDE. "Sampling of Uncertain Probabilities at Event Tree Nodes with Multiple Branches." *Reliability Engineering and System Safety* 70 (2000): 197-203.
- PLANAS, P. C., J. A. VILCHEZ, e J. CASAL. "Fire and Explosion Hazards During Filling/Emptying of Tanks." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 12 (1999): 479-483.
- POURGOL-MOHAMAD, M., A. MOSLEH, e M. MODARRES. "Methodology for the Use of Experimental Data to Enhance Model Output Uncertainty Assessment in Termal Hydraulics Codes." *Reliability Engineering and System Safety* 95 (2010): 77-86.
- PULA, R., F. KHAN, P. AMYOTTE, e B. VEITCH. "Revised Fire Consequence Model for Offshore Quantitative Risk Assessment." *Journal of Loss Prevention in Process Industries* 18 (2005): 443-454.
- R Core, Development Team. "R: A Language and Environment for Statistical Computing." Vers. 2.7.0. 2008. http://www.R-project.org.
- RAUSAND, M., e A. HOYLAND. System Reliability Theory; Models, Statistical Methods and Application. Ney Jersey: Wiley, 2004.
- RAVINDRA, M. K. "System Reliability Considerations in Probabilistic Risk Assessment of Nuclear Power Plants." *Estuctural Safety* 7 (1990): 269-280.
- REIS, S. P. Transporte Marítimo de Petróleo e Derivados na Costa Brasileira: Estrutura e Implicações Ambientais. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- REN, J., I. JENKISON, J. WANG, D. XU, e J. YANG. "A Methodology to Model Causal Relationship on Offshore Safety Assessment Focusing on Human and Organizational Factor." *Journal of Safety Research* 39, n. 1 (2008): 87-100.
- RETTEDAL, W. K., T. AVENT, e O. T. GUDMESTAD. "Integrating QRA and SRA Methods within a Bayesian Framework when Calculating Risk in Marine Operations." *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 122 (2000): 181-188.

RODRIGUEZ, C. E. P., e G. F. M. SOUZA. "Decision Making Model for Offshore Offloading Operations Based on Probabilistic Risk Assessment." *ISUMA*. Maryland: American Society Civil Engineerier, 2011. 1-8.

- RODRIGUEZ, C. E. P., G. F. M. SOUZA, e M. R. MARTINS. "Risk-based analysis of offloading operations with FPSO production units." *Proceedings of COBEM*. Gramado: ABCM, 2009.
- ROED, W, A MOSLEH, J E VINNEM, e T AVEN. "On the use of the hybrid causal logic method in offshore risk analysis." *Reliability Enginering and System Safety* 94 (2009): 445-455.
- ROMERO, J. P. Maximum Entropy. Tese de Doutorado, Mexico D.F.: Unam, 2008.
- ROSQVIST, T., e R. TUOMINEN. "Qualification of Formal Safety Assessment: an Exploratory Study." *Safety Science* 42 (2004): 99-120.
- ROSSING, N. L., M. LIND, N. JENSEN, e S. B. JORGENSEN. "A Functional HAZOP Methodology." *Computers and Chemical Engineering* 34 (2010): 244-253.
- RUSHBY, J. "Critical System Properties: Survey and Taxonomy." *Reliability Engineering* and System Safety, 1994: 189-219.
- RUUD, S., e A. MIKKELSEN. "Risk-based rules for crane safety system." *Reliability Engineering & System Safety*, n. 93 (2008): 1369-1376.
- SANCHEZ, M. *Introduccion a la confiabilidad y evaluación de riesgos*. Bogotá: Uniandes, 2005.
- SAPHIRE, User Group. The basic Manual of System Analysis Program for Hand-On Integrate Reliability Evaluation. 1997.
- SAVSAR, M. "Reliability analysis of a flexible manufacturing cell." *Reliability Engineering* and System Safety 67 (2000): 147-152.
- SCHUYLER, J. *Risk and Decision Analysis in Projects*. Pennsylvania: Project Management Institute, Inc., 2002.
- SCIPIONI, A., G. SACCAROLA, A. CENTAZZO, e F. ARENA. "FMEA Methodology Design, Implementation and Integration with HACCP System in a Food Company." *Food Control* 13 (2002): 459-501.
- SENDI, P. P., e R. T. CLEMEN. "Sensitivity Analysis on a Chance Node with More Than Two Branches." *Medical Decision Making*, 1999: 487-499.

SHALEV, D. M., e J. TIRAN. "Condition-Based Fault Tree Analysis (CBFTA): A New Method for Improved Fault Tree Analysis (FTA), Reliability and Safety Calculations." *Reliability Engineering and System Safety* 92, n. 9 (2007): 1231-1241.

- SHEIKH, A., e A. AL-GARNI. "Reliability Analysis of Aeroplane Tyres." *International Journal of Quality and Reliability Management* 13, n. 8 (1996): 28-38.
- SIMKINS, D. J., e J. V. BUKOWSKI. "Bayesian Reliability Evaluation of Computer Systems." *Computer and Electrical Engineering* 11 (1984): 79-86.
- SINGPURWALLA, N D. *Reliability and Risk: A Bayesian Perspective*. London: John Wiley & Son Ltda, 2006.
- SIU, N O, e D L KELLY. "Bayesian parameter estimation in probabilistic risk assessment." Reliability Engineering and System Safety 62 (1998): 89-115.
- SMITH, D. J. Reliability, Maintainability and Risk. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000.
- SOARES, C., e A. TEIXEIRA. "Risk assessment in maritime transportation." *Reliability Engineering and System Safety* 74, n. 3 (2001): 299-309.
- SOUZA, Gilberto Francisco Martha. *Análise de Confiabilidade Aplicada oa Projeto de Sistemas Mecânicos*. São Paulo: Departamento de Engenharia Macatrônica e Sistemas Mecânicos, 2003.
- SOUZA, Gilberto Francisco Martha. *PMR 5401 Análise de Risco Aplicada a Avaliação da Integridade de Sistemas Mecânicos*. São Paulo Brasil: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- SOUZA, J. Operação de navios aliviadores e FPSO. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: <cepatino@gmail.com> (22 de Maio de 2011).
- STAMATELATOS, M. Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA managers and practitioners. Waschington, DC: OSMA, 2002.
- TANG, D., R. ZHU, J. TANG, R. XU, e R. HE. "Product Design Knowledge Management based on Design Structure Matrix." *Advanced Engineering Informatics* 24 (2010): 159-166.
- Tanker Operator. "Shuttles forged in the crucible." *Tanker Operator*, Abril 2003.
- TANNURI, E. A. Desenvolvimento de metodologia de projeto de sistema de posicionamento dinâmico aplicado a operações em alto mar. Teses de Doutorado, São Paulo: Escola Politecnica, Universidade de São Paulo, 2002.

TANNURI, E. A., C. P. PESCE, P. C. AZEVEDO, C. H. FUCATU, e A. N. SIMOS. "Seasonal Downtime Analysis of DP and Non-DP Offloading Operation in Brazilian Waters." *Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering - OMAE2010.* Shanghai: ASME, 2010. 1-7.

- TANNURI, E. A., H. M. MORISHITA, A. N. SIMOS, A. C. SAAD, S. H. CORREA, e S. H. SPHAIER. "DP Assisted Offloading Operations in Brazilian Water." *Dynamic Positioning Conference*. Marine Technology Society, 2009. 1-20.
- TAYLOR, D. A. Introduction to Marine Engineering. Oxford: Elsevier Ltd., 2007.
- TJALLEMA, A., H. GRIMMELIUS, C. VAN DER NAT, e D. STAPERSMA. "The Road to Elimiating Operator Related Dynamic Positioning Incidents." *Dynamic Positioning Conference*. Houston, 2007. 1-17.
- TODINOV, M. Risk-Based Reliability Analysis and Generic Principles for Risk Reduction. Bedfordshire, U.K: ELSEVIER, 2006.
- TRUCCO, P., E. CAGNO, F. RUGGERI, e O. GRANDE. "A Bayesian Belief Network modelling of organisational factors in risk analysis: A case study in maritime transportation." *Reliability engineering and System Safety* 93, n. 6 (2008): 823-834.
- TSB. "Marine Report- Safety Studies." *Transportation safety board of canada.* Jan. de 2011. www.tsb.gc.ca (acesso em Mar. de 2011).
- —. Transportation Safety Board of Canada. Jul. de 2005. www.tsb.gc.ca (acesso em Maio de 2010).
- TUSIANI, M. The petroleum shipping industry. Oklahoma: PennWell, 1996.
- UKOOA. FPSO / Tanker Risk Control During Offtake. Tandem Loading Guidelines, UKOOA Oil and Gas for Britain, 2001.
- VENKATASUBRAMANIAN, V., J. ZHAO, e S. VISWANATHAN. "Intelligent Systems for HAZOP Analysis of Complex Process Plants." *Computers and Chemical Engineering* 24 (2000): 2291-2302.
- VILCHEZ, J. A., V. ESPEJO, e J. CASAL. "Generic Event Trees and Probabilities for the Release of Different Types of Hazardous Materials." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 24 (2011): 281-287.
- VILLEMEUR, A. Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment. Chichester, England: John Wiley, 1992.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 196

VINNENM, J., A. TERJE, T. HUSEBO, J. SELJELID, e O. TVEIT. "Major hazard risk indicatiors for monitoring of tends in the Norwegian offshore petroleum sector." *Reliability Engineering and System Safety* 91, n. 7 (2006): 778-791.

- WALKER, M, e Y PAPADOPOULOS. "Qualitative temporal analysis: Towards a full implementation of the Fault Tree Handbook." *Control Engineering Practice* 17, n. 10 (2009): 115-1125.
- WANG, , J X, e M L ROUSH. What Every Engineer should know About Risk Engineering and Management. New York: Marcel Dekker, Inc., 2000.
- WANG, J. "The current status and future aspects in formal ship safety assessment." *Safety Science* 38 (2001): 19-30.
- WASH-1400. *Reactor Safety Study*. National Technical Information Service, Springfield: United States Nuclear Regulatory Commission, 1975.
- WEIBULL++7, RELIASOFT. User's Guide. Tucson: ReliaSoft Corporation, 2005.
- WINSTON, W. L. Operations Research: Applications and Algorithms. Belmont: Tomson Brooks, 1994.
- WU, J. S., e G. E. APOSTOLAKIS. "Experience with Probabilistic Risk Assessment in the Nuclear Power Industry." *Journal of Hazardous Material* 29 (1992): 313-345.
- YASSERI, S. F., e J. PRAGER. "Explosion Recurrence Modeling." *Proceedings of the 23rd OMAE Conference*. Vancuver: OMAE, 2004. 63-69.
- YUN, G. W., W. J. ROGERS, e M. S. MANNAN. "Risk assessment of LNG importation terminals using the Bayesian-LOPA methodoloy." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22 (2009): 91-96.

# APÊNDICE A DESCRIÇÃO DE OPERAÇÃO DO MOTOR DE COMBUSTÃO PRINCIPAL DO NAVIO ALIVIADOR

O Motor de Combustão Principal do navio aliviador é um motor Diesel que aspira ar e que, após ser comprimido no interior dos cilindros, recebe o combustível sob pressão superior àquela em que o ar se encontra. A combustão ocorre por autoignição quando o combustível entra em contato com o ar aquecido pela pressão elevada. O combustível que é injetado ao final da compressão do ar, na maioria dos MCP dos navios aliviadores, são óleos minerais mais pesados que precisem de um sistema de aquecimento adicional para poder ser injetado.

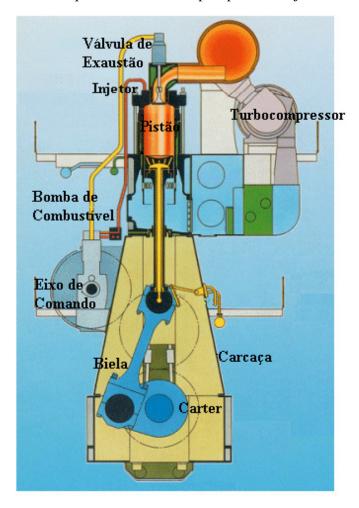


Figura B.1 Estrutura Motor de Combustão interna de dois tempos (MAN, 2009)

### Sistema de Resfriamento

Sem um adequado resfriamento, as partes do motor estariam expostas a altas temperaturas, como resultado da queima do combustível, e falhariam. O arrefecimento do MCP ocorre pela circulação de líquido refrigerante em torno das passagens internas do motor. O líquido refrigerante é então aquecido e, por sua vez, é resfriado por água do mar que circula dentro de um trocador de calor. Normalmente, o líquido refrigerante usado é água tratada, já que a água do mar não pode ser usada diretamente por ser um fluido corrosivo. Algumas vezes é usado óleo lubrificante já que ,no caso de vazamento, não causaria problemas em relação à lubrificação mas, devido ao seu baixo calor específico, seriam necessárias duas vezes a quantidade de óleo em relação à água doce.

O sistema de resfriamento está composto de dois subsistemas: Motor e Pistão. O primeiro subsistema que foi nomeado de "Sistema de Resfriamento do Motor" está destinado a esfriar o cilindro, o cabeçote e o turbo compressor. O segundo subsistema é um sistema independente que tem como função única resfriar o pistão.

A água de arrefecimento do motor, após deixar o cilindro, passa pelo trocador de calor e, em seguida, para as bombas de circulação de água para refrigerar as cabeças dos cilindros e o turbo compressor. O sistema de resfriamento do pistão emprega componentes similares, com exceção do sistema de armazenamento de água que no caso do pistão usa um sistema de preaquecimento a vapor.

#### Sistema de Alimentação de Combustível

O MCP precisa, para a autoignição e queima perfeita, de combustíveis de alto ponto de ignição, como é o caso dos óleos pesados. A pré-combustão é a tendência do combustível à autoignição quando da injeção, no motor, e é característica importante para o desempenho do combustível. Para fornecer o combustível necessário, na quantidade certa, no momento adequado e nas condições apropriadas para a combustão o sistema requer um correto abastecimento e uma adequada injeção.

Como observado na Figura B.2, o processo de alimentação de combustível se inicia no armazenamento do óleo em tanques no casco duplo. O óleo armazenado é bombeado para o tanque onde são extraídas algumas impurezas para, então, ser aquecido. Em seguida, o óleo recebe uma segunda fase de purificação através de uma centrífuga e o óleo limpo e quente é bombeado para o tanque de serviço diário que possui um respiradouro para evitar as sobre pressões. Do tanque de serviço diário, o óleo combustível passa através de uma válvula de três vias para um tanque de mistura e de retorno. A partir daí, usando bombas auxiliares, o óleo

combustível é conduzido para a bomba de injeção passando antes pelos aquecedores e o regulador de viscosidade que controlam a temperatura com o objetivo de prover a viscosidade correta para injeção e a combustão.

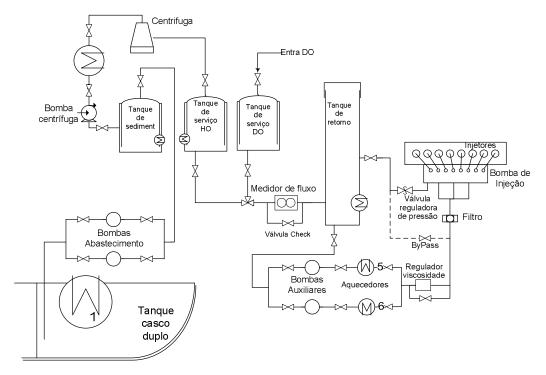


Figura B.2 Sistema de abastecimento de combustível

A bomba de injeção descarregará o combustível a alta pressão para seus respectivos injetores. Neste tipo de motor tem-se uma bomba injetora para cada cilindro e, usualmente, é operada uma vez a cada ciclo. Quando o pistão é empurrado para cima, a pressão do combustível, dentro do cilindro, sobe rapidamente. A alta pressão abre o injetor e o combustível é pulverizado dentro do cilindro em gotículas, este processo é conhecido como atomização.

A injeção toma lugar num curto período de tempo, este período deve ser preciso e controlado, um atraso ou adiantamento da injeção resultará em uma perda da potência do motor e pode ocasionar ao dano do MCP. A regulação da injeção é muito importante, cames suportados no eixo de comando são usados para operar a bomba de injeção em cada cilindro. Bombas convencionais não podem ser usadas no sistema de injeção de combustível, devido ao fato de que estas sempre empregam uma quantidade de combustível constante e uma vez que o motor tenha partido isto resultaria em um aumento indesejado da velocidade. Então, por isso, deve ser utilizado um método que irá variar infinitamente a quantidade de combustível injetada. Para este objetivo pode ser usada uma bomba com injetor em hélice ou uma bomba com válvulas controladoras.

No primeiro método, o pistão da bomba tem uma hélice usinada com um sulco vertical e um sulco anelar na base da hélice, como mostrado na Figura B.3. O pistão oscila dentro do cilindro da bomba que tem portas de saída de combustível (*spill ports*) localizadas de modo que estas estejam acima da cabeça do pistão quando o came esteja na parte superior do seu percorrido. O pinhão é engrenado a uma cremalheira que muda a posição relativa do pistão em relação ao cilindro e que está conectada ao governador do cilindro. Assim, a quantidade de combustível variará dependendo da posição relativa da hélice e das portas de saída de combustível.

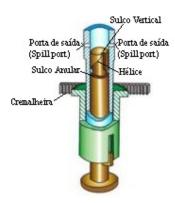


Figura B.3. Pistão com hélice

O desgaste devido às partículas abrasivas no combustível significará que a bomba demorará mais tempo em atingir a pressão de injeção requerida, do mesmo modo que o desgaste devido à erosão que ocorre na borda superior do êmbolo no gume das hélices e das portas de saída de combustível. Isto juntamente com o desgaste do pistão e o cilindro da bomba, tornarão o tempo de injeção no sistema.

Neste tipo de sistema, o final da injeção varia mas o início da injeção é fixo. Para variar o início da injeção, é colocada na parte inferior do cilindro da bomba uma bucha com rosca que é acionada por um pinhão e uma cremalheira. Com este mecanismo, a posição relativa às portas de saída do combustível e o cilindro é mudada, o que altera o início da injeção.

No segundo método, para controlar a quantidade de combustível injetado, é usada uma bomba com válvulas controladoras de sucção e de retorno (*spill valve*) operadas por vielas.

Duas alavancas articuladas operam as vielas que abrem as válvulas de sucção e de retorno (*spill valve*). Quando o came está na parte mais alta de sua trajetória a válvula de sucção é aberta e a válvula de retorno é fechada. Quando o êmbolo sobe, a viela de sucção fecha a válvula de sucção. Neste ponto, a injeção começa e o combustível é direcionado para os injetores. Do mesmo

modo, quando o êmbolo desce a viela de retorno, abrirá a válvula de retorno, a pressão acima do pistão diminuirá e a injeção cessará.

Para o combustível queimar nos tempos certos, o mesmo deve ser dividido em gotas minúsculas em um processo conhecido como atomização. As gotículas penetram o suficiente no espaço da combustão para se misturar com o oxigênio. A temperatura das gotículas cresce rapidamente, absorvem a energia calorífica do calor do cilindro e, então, acendem e queimam antes de tocar a superfície fria do pistão, dando lugar à combustão. Os responsáveis pela atomização são os injetores.

Os injetores estão divididos em duas partes: o bico injetor e o corpo, este último é composto pela mola, da haste e da porca, que junta o bico e a haste. O bico injetor se levanta no começo da injeção devido ao impacto da pressão na linha de combustível, suprida pela bomba injetora. Durante os intervalos de tempo entre as injeções, ele se mantém fechado automaticamente pela ação de uma mola. Uma pequena quantidade de combustível, utilizada para lubrificar e remover calor das partes móveis dos injetores, é retornada ao sistema de alimentação de combustível.

Os injetores dever ser mantidos em boas condições para manter a eficiência do sistema e devem ser trocados em linha conforme as recomendações do fabricante, *overhaul* e/ou testes. A mola pode perder sua tensão pela operação repetitiva deixando a abertura do injetor em uma pressão mais baixa da projetada. O bico injetor se desgasta e causa uma incorreta atomização.

#### Sistema de Partida

A função do sistema de partida é vencer a inércia e iniciar o movimento do motor de combustão até que o mesmo entre em funcionamento. A partida a ar comprimido é feita por meio da descarga de certa quantidade de ar sob alta pressão em um cilindro predefinido, cujo êmbolo é posicionado próximo ao ponto morto superior para receber o primeiro impulso. Ao deslocar-se rapidamente em sentido descendente, faz com que em outros cilindros os êmbolos atinjam o ponto morto superior do tempo de compressão e recebam injeção de combustível, iniciando o funcionamento.

O ar é armazenado em reservatórios chamados de ampolas. O ar é admitido no cilindro quando o pistão está próximo ao ponto morto superior e continuará até pouco antes da válvula de escape se abrir. A abertura da válvula principal é controlada por um conjunto de válvulas piloto que por sua vez estão sincronizadas ao eixo de comando de válvulas.

Quando o motor é requerido para partir, um sinal de baixa pressão é enviado para o sistema de controle de válvulas de partida. O ar empurra o pistão para abaixo e permite que o ar sob alta

pressão possa fluir para a válvula piloto. A válvula piloto é forçada para baixo pela ação do eixo de comando, o ar flui para o êmbolo da válvula principal, abrindo a válvula e permitindo que o ar de alta pressão passe dentro do cilindro.

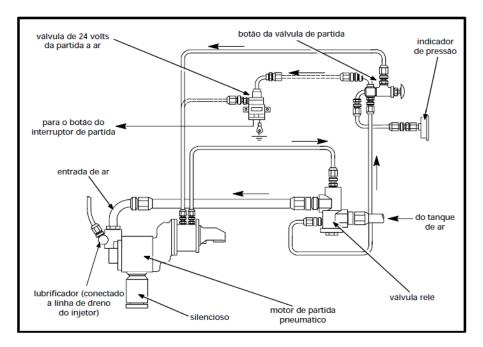


Figura B. 4 Diagrama do Sistema de Partida

#### Sistema de Admissão de Ar

Tem como objetivo principal introduzir o máximo possível de mistura de combustível dentro do cilindro. Quando a válvula de admissão está aberta, o ar é sugado para dentro do motor, de forma que o ar no duto de admissão se move mais rapidamente em direção ao cilindro. Quando a válvula de admissão se fecha repentinamente, esse ar para bruscamente e se comprime, formando uma área de alta pressão. Essa onda de alta pressão percorre seu caminho até o duto de admissão, para longe do cilindro.

O sistema possui um turbo-compressor que comprime o ar que entra no motor e permite ao motor receber mais ar dentro dos cilindros. Obtém-se, portanto, mais potência das explosões em cada cilindro. O turbo-compressor utiliza o fluxo dos gases de escapamento do motor para girar uma turbina que, por sua vez, gira um compressor e como está ligada ao escapamento, as temperaturas dentro dela também são bem elevadas.

### Sistema de Exaustão

Da combustão da mistura carburante dentro dos cilindros resultam produtos que devem ser conduzidos até o exterior. Os gases de escape abandonam os cilindros pelas válvulas de escape, percorrendo posteriormente as condutas de escape até atingirem o exterior. Assim, o sistema de exaustão tem como função eliminar os gases residuais do motor queimados na combustão, minimizando o máximo possível a poluição. Nesse processo, o coletor irá selecionar respectivamente os cilindros de maneira a ficar em sincronismo com os momentos de abertura das válvulas de descarga dos cilindros evitando-se o refluxo de gases, um dos componentes que atuam na elevação dos índices de poluição e perda de rendimento do motor.

#### Sistema de Lubrificação

O óleo lubrificante do bloco do motor é armazenado no cárter ou em um tanque localizado embaixo do motor. O óleo é escoado através do sistema de purificação e com a ajuda das bombas passa pelo sistema de resfriamento antes de entrar no motor. Na sequência, é distribuído pelas tubulações para o bloco. Uma vez lubrificado o motor, o óleo é drenado de volta para o cárter.

O sistema de lubrificação do bloco do motor possui um sistema de resfriamento de óleo que, no trocador de calor, circula água doce com menor pressão que o óleo lubrificante para que, no caso de um vazamento no sistema, não exista chance de o óleo lubrificante ser contaminado pela água. Por sua vez, a água doce é resfriada por outro trocador de calor que funciona com a água do mar em circuito aberto.

#### Sistema de Combustão

É o local onde ocorre a combustão e é composto de um mecanismo capaz de transformar os movimentos alternativos dos pistões em movimento rotativo da árvore de manivelas. A combustão da mistura combustível acima do pistão produz um rápido aumento na pressão e temperatura, empurrando o pistão para baixo, produzindo potência.

Os componentes básicos do sistema de combustão são os seguintes: bloco do motor, conjunto do pistão, cilindro (cabeçote do cilindro) e mecanismo de válvulas. O bloco do motor é o maior e o principal componente do motor.

Os pistões se ajustam nos cilindros e deslizam livremente para cima e para baixo. O bloco permite a passagem de óleo, para a lubrificação do motor, e de água, para seu resfriamento. As passagens de fluido de resfriamento são chamadas de camisas de água e as passagens de óleo são chamadas de galeria de óleo.

Por um furo feito na parte inferior do bloco passa a árvore de manivelas. A árvore de manivelas, também conhecida como virabrequim, é responsável por converter o movimento,

vertical do pistão em movimento de rotação. Os pistões transferem a potência gerada pela combustão para a biela e para a árvore de manivelas.

O mecanismo de válvulas tem a função de comandar a abertura e o fechamento das válvulas de admissão e exaustão nos momentos adequados. Este sistema inclui o eixo de comando das válvulas, o conjunto sincronizador e os mecanismos de comando como alças, hastes, balancim, molas e válvulas.

### A.1. ANÁLISE DE MATRIZES DE DEPENDÊNCIA PARA O MCP

A partir da descrição feita acima, estabelecem-se as matrizes de dependência para o sistema do MCP. Estas matrizes mostram a relação de dependência que existem entre os diversos sistemas, embora não exista uma relação funcional direta.

O sistema de alimentação de combustível é suportado pelo sistema de combustão já que os cames suportados no eixo de comando são usados para operar a bomba de injeção.

O sistema de alimentação de combustível é suportado pelo sistema de controle já que o pinhão é engrenado a uma cremalheira que poder mudar a posição relativa do pistão em relação ao cilindro e que está conectada ao governador do cilindro.

Sistema Suportado por <b>⊎</b>	Sistema de resfriamento	Sistema de Alimentação de combustível	Sistema de Partida	Sistema de Admissão de ar	Sistema de Exaustão	Sistema de Iubrificação	Sistema de combustão	Sistema de controle
Sistema de resfriamento						×	×	
Sistema de Alimentação de combustível							*	
Sistema de Partida							×	
Sistema de Admissão de ar							*	
Sistema de Exaustão				*			×	
Sistema de Iubrificação	*			*			*	
Sistema de combustão	*	*		*				
Sistema de controle	×	*	*	*		*	×	

Figura B.5. Matriz de dependência para o Motor de Combustão Principal

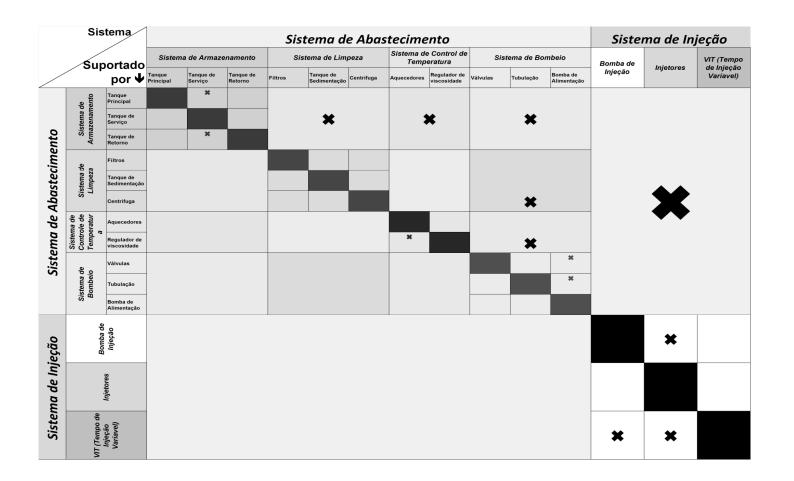


Figura B.6. Matriz de dependência para o Sistema de abastecimento de combustível

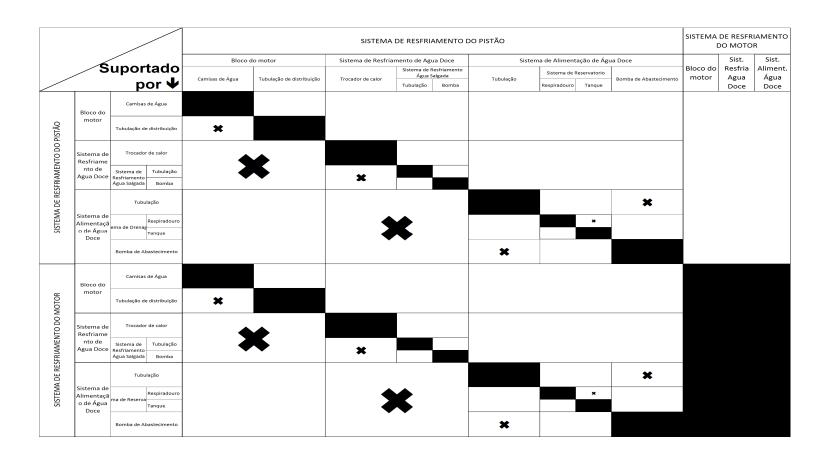


Figura B.6. Matriz de dependência para o Sistema de abastecimento de combustível

# APÊNDICE B ANÁLISE PRELIMINAR DE PERIGOS PARA A OPERAÇÃO DE OFFLOADING

Cada uma das colunas da tabela que resume a análise preliminar de perigos apresenta-se descrita a seguir:

- **A OPER:** Designa a etapa específica do *Offloading* que se está realizando: Aproximação, Conexão, Transferência, Desconexão e Afastamento.
- B IDENTIFICAÇÃO DO EVENTO: Numeração consecutiva que identifica o evento.
- C EVENTO DE PERIGO: Corresponde a uma ou mais condições físicas com potencial para causar danos às pessoas, à propriedade, ao meio ambiente ou à combinação desses.
- **D DESCRIÇÃO DE EVENTO:** Explica como se manifesta o evento de perigo e define algumas características específicas.
- CAUSA: Identifica por que ocorre o evento de perigo. Inclui a descrição, a frequência e a ação de mitigação
  - E DESCRIÇÃO DA CAUSA: Corresponde a uma ou mais condições físicas que originam o evento de perigo.
  - F FREQUÊNCIA: Apresenta de forma qualitativa qual é a possibilidade de ocorrência da falha, sendo definidas 5 categorias: Extremamente Remota (A), Remota (B), Pouco Provável (C), Provável (D), Frequente (E), definidas conforme.
  - G AÇÃO DE MITIGAÇÃO: Descreve o conjunto de atividades que podem ser efetuadas para manter os sistemas cumprindo as suas funções e reduzir a possibilidade de que o evento de perigo ocorra.
- CONSEQUÊNCIA: Define os efeitos que teria o evento de perigo sobre o sistema, definindo-se como efeito de uma condição de operação fora da especificação inicial da missão.

- H LOCAL: Explica como seria afetado o navio aliviador no caso de acontecer o evento de perigo.
- I OFFLOADING NAVIO: Explica como seria afetada a operação de offloading no caso de acontecer o evento de perigo.
- J —AÇÃO DE CONTINGÊNCIA: São listadas as recomendações de ações de emergência visando evitar ou minimizar a propagação da consequência ou a redução da gravidade das mesmas.
- SEVERIDADE: Escala numérica que define a gravidade dos efeitos que teria o evento de perigo, caso aconteça. Está definida para três ativos e apresentada na Tabela 2.2.
  - K SEGURANÇA PESSOAL: Relacionados com os danos ou lesões que podem ser causadas a empregados e terceiros.
  - L EQUIPAMENTO: Relacionados aos danos que podem ser causados a equipamentos ou instalações no navio aliviador ou FPSO.
  - M AMBIENTAL: Relacionados aos danos causados ao meio ambiente.
- N CLASSIFICAÇÃO DO RISCO: Medida resultante da combinação entre as frequências de ocorrência e a magnitude severidade das consequências, conforme apresentado na Figura 2.6.

O P E R	#	EVENTO DE PERIGO	DESCRIÇÃO DE EVENTO	DESCRIÇÃO DA CAUSA	FREQÜÊNCIA DA CAUSA	AÇÃO DE MITIGAÇÃO DA CAUSA	CONSEQUENCIA LOCAL (aliviador)	CONSEQUENCIA OFFLOADING NAVIO	AÇÃO DE CONTINGÊNCIA DA CONSEQUENCIA	T SEG. PESSOAL	▼ EQUIPAMENTO	ω AMBIENTAL		SSIFICA	ÇÃO DO RISCO
				Falha na manutenção				Possibilidade de	Abortar operação de aproximação e						
	1	FALHA M.C.A. DO ALIVIADOR	PARADA DO SISTEMA DIESEL-GERADOR	Falta de lubrificação	PROVÁVEL (D)	Utilizar rotinas de manutenção rígidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	Falha bombas hidráulicas	colisão com impacto médio, seguido de incêndio	solicitar o rebocador para afastar o aliviador das proximidades da unidade de produção	Ш	Ш	Ш	NT N	T NT	NÃO TOLERÁVEL
				Falha equipamento			Falha de equipamento	incendio	produção						
	2	PERDA DO SISTEMA DE GOVERNO	INCAPACIDADE DE OPERAR O SISTEMA DE GOVERNO DO NAVIO	Falha na manutenção	POUCO PROVÁVEL (C)	Utilizar rotinas de manutenção rígidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	Navio aliviador sem governo	Atraso na operação moderado, com possibilidade de colisão no caso de falha do sistema DP	Abortar operação de aproximação e solicitar um rebocador para afastar o navio das proximidades do terminal	П	II	"	M I	иМ	MÉDIO
				Falha de VHF, portátil, e bateria		Substituir equipamento e ou bateria			Abortar operação de aproximação até a realização de manutenção						
A P R	3	SEM COMUNICAÇÃO	INCAPACIDADE DE TRANSMITIR INFORMAÇÕES ENTRE A	Interferência com outras instalações	REMOTA (B)	Mudar de freqüência	Incapacidade de comunicação com a	Atraso na operação Ieve	Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de	1	ı	1	т .	г	TOLERÁVEL
O X I M			FPSO E NAVIO ALIVIADOR	Problemas de compreensão do idioma	POUCO PROVÁVEL (C)	Utilizar o CIS (código internacional de sinais) ou vocabulário marítimo padrão	unidade de produção		produção, se não restabelecer comunicação com o terminal						
A Ç Ã O	4	FALHA GUINCHO DA	SE TRAVA OU NÃO GIRA	Falha na alimentação vapor ou pressão hidráulica	POUCO PROVÁVEL	Revisão permanente da linha de transmissão de fluído	Incapacidade de recebimento do cabo do	Atraso na operação	Abortar operação de aproximação até a realização de manutenção		-	_	т .		TOLERÁVEL
	7	POPA DO ALIVIADOR	SE MAYA GONAG GINA	Falha mecânica	(C)	Utilização de rotinas de manutenção dos geradores de pressão hidráulica ou de vapor	rebocador	leve	Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção	·			·		TOLENAVEE
				Problema thruster		Utilizar rotinas de manutenção			Abortar operação de aproximação			1			
	5	FALHA SISTEMA DE POCISIONAMENTO	PERDA DA	Falha na manutenção	PROVÁVEL	rígidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	lncapacidade de	Possibilidade de colisão com impacto			,,,		NT N	T NT	NÃO
	3	DINÂMICO	POSIÇÃO	Problemas na geração	(D)	Utilização de rotinas de manutenção dos geradores	manutenção de posição	· ·	Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção utilizando o MCP						TOLERÁVEL
				Problema Satélite GPS		Verificar avisos ao navegantes sobre informações de satélites									

Figura B1. Análise Preliminar de Perigos (Continuação)

MÉDIO	
NÃO TOLERÁVEL	
NÃO TOLERÁVEL	
MÉDIO	
MÉDIO	

мм

IV IV IV NT NT NT

IV IV IV NT NT NT

II M M M

М

М

Abortar operação de aproximação

Executar procedimento de afastamento

Solicitar auxílio de rebocador

Abortar operação de aproximação

xecutar procedimento de afastamento

Executar procedimento de afastamento

do aliviador em relação à unidade de

Solicitar um barco de manutenção para

substituir o mensageiro do hawser e

aguardar a realização de manutenção

xecutar procedimento de afastamento

do aliviador em relação à unidade de

Realizar operação de manutenção

Abortar operação de amarração

do aliviador em relação à unidade de

Abortar operação de amarração

produção

orodução

do aliviador em relação à unidade de produção utilizando o sistema DP

Solicitar embarcação de apoio

Possibilidade de

Possibilidade de

alto, seguida de

ambiental

desfavorável

ossibilidade de

alto, seguida de

mbiental

desfavorável

Atraso na operação

ossibilidade de

Atraso na operação

possibilidade de lesõe

moderado, com

leves

. colisão caso a operação

noderado, com

prossiga

colisão com impacto

ncêndio em condição

Sobre carga no MCP e no

Sobre carga no MCP e no

O navio pode sair do

alinhamento com a

ncapacidade de

Incapacidade de

recebimento do

nensageiro

recebimento do Hawser

unidade de produção

colisão com impacto

incêndio em condição

colisão caso a operação

Figura B1. Análise Preliminar de Perigos (Continuação)

Utilizar rotinas de manutenção

(check list de atividades)

rogramar o navio com

Observar as condições

área de manobra

meteorológicas antes adentrar

nspeção visual antes da manobra.

Revisão permanente da linha de

ransmissão de fluído

Utilização de rotinas de

manutenção dos geradores de

pressão hidráulica ou de vapor

antecedência de 48 h antes do

inicio da operação de offloading

rígidas, com a utilização de roteiros Perda de propulsão

Falha Bomba injetora

Falha no Cilindro

Falha da programação

em programar o navio

Erro de julgamento da

Erro de avaliação das

Mudança inesperada

manobra

condições

meteorológicas

das condições

Tração acima da

Envelhecimento do

permitida

cabo

hidráulica

SE TRAVA OU NÃO GIRA vapor ou pressão

ambientais

POUCO PROVÁVEL

FREQÜENTE

(E)

PROVÁVEL

(D)

POUCO PROVÁVEL

POUCO PROVÁVEL

(C)

PARADA DO MOTOR

COMBUSTÃO

DEVIDO A PRESSÃO

AMARRAR O NAVIO A

FIM DE EVITAR PARADA

MUDANÇA DE

FAVORÁVEL PARA

DESFAVORÁVEL

PERDA DA AMARRAÇÃO

COMERCIAL PARA

DE PRODUÇÃO

FALHA M.C.P. DO

ALIVIADOR

EXECUÇÃO DE

MANOBRAS

ARRISCADAS

MUDANÇA DAS

CONDIÇÕES

**AMBIENTAIS** 

ROMPIMENTO

MENSAGEIRO DO

HAWSER

FALHA GUINCHO DE

PROA DO ALIVIADOR

Μ

Α

Ç

М

10

ANÁLISE PRELIMINAR DE PERIGOS PARA A OPERAÇÃO DE OFFLOADING

									Abortar operação de amarração						
	11	FALHA NO MORDENTE DO ALIVIADOR	PERDA DA AMARRAÇÃO	Falha de manutenção	REMOTA (B)	Utilizar rotina de manutenção e chek list antes da operação	Incapacidade de recebimento do Hawser	Atraso na operação Ieve	Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção	1	ı	1	т	т	TOLERÁVEL
									Realizar operação de manutenção						
	12	EXECUÇÃO DE MANOBRAS	DEVIDO A PRESSÃO COMERCIAL PARA AMARRAR O NAVIO A	Falha da programação em programar o navio.	FREQÜENTE	Programar o navio com antecedência de 48 h antes do	Sobrecarga no MCP e no	Possibilidade de colisão com impacto alto, seguida de	Solicitar auxílio de rebocador	IV	IV.	IV	NT.	IT NT	NÃO
	12	ARRISCADAS	FIM DE EVITAR PARADA DE PRODUÇÃO	Erro de julgamento da manobra	(E)	inicio da operação de offloading	DP	incêndio em condição ambiental desfavorável	Soficital auxilio de resocador	10	IV	IV	N	II NI	TOLERÁVEL
	13	MUDANÇA DAS CONDIÇÕES	MUDANÇA DE FAVORÁVEL PARA	Erro de avaliação das condições meteorológicas	PROVÁVEL	Observar as condições meteorológicas antes adentrar	Sobrecarga no MCP e no DP	Possibilidade de colisão com impacto alto, seguida de	Abortar operação de aproximação	IV	DV.	n/	NT	IT NT	NÃO
A M A R	13	AMBIENTAIS	DESFAVORÁVEL	Mudança inesperada das condições ambientais	(D)	área de manobra	O navio pode sair do alinhamento com a unidade de produção	incêndio em condição ambiental desfavorável	Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção	IV	IV	IV	NIII	II NI	TOLERÁVEL
R A				Falha na manutenção			Falls to a base 1947 Page		Abortar operação de amarração						
Ç		FALLIA MAC A DO	DADADA DO CICTEMA	Falta de lubrificação	DROVÁVEL	Utilizar rotinas de manutenção	Falha bombas hidráulicas	Possibilidade de	Solicitar embarcação de apoio			- 1			NÃO
)	14	FALHA M.C.A. DO ALIVIADOR	PARADA DO SISTEMA DIESEL-GERADOR	Falha equipamento	PROVÁVEL (D)	rígidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	Falha de equipamento	colisão com impacto médio, seguido de incêndio	Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção	Ш	Ш	III	1 TM	IT NT	TOLERÁVEI
				Falha Bomba injetora				Atraso na operação	Abortar operação de offloading Solicitar embarcação de apoio						
	15	FALHA M.C.P. DO ALIVIADOR	PARADA DO MOTOR COMBUSTÃO	Falha no Cilindro	POUCO PROVÁVEL (C)	Utilizar rotinas de manutenção rígidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	Perda de propulsão	médio, com possibilidade de colisão se o problema persistir	Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção utilizando o sistema DP	Ш	Ш	Ш	М	мм	MÉDIO
				Problema thruster		Utilizar rotinas de manutenção rígidas, com a utilização de roteiros			Aborton anno 27 al a efficadio						
	16	FALHA SISTEMA DE	PERDA	Falha na manutenção	PROVÁVEL	(check list de atividades)	Incapacidade de	Possibilidade de colisão com impacto	Abortar operação de offloading				NT.	IT NT	NÃO
	16	POCISIONAMENTO DINÂMICO	DA POSIÇÃO	Problemas na geração	(D)	Utilização de rotinas de manutenção dos geradores	manutenção de posição	médio, seguido de incêndio	Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de	Ш	""	"	NI	I	TOLERÁVEL
				Problema Satélite GPS		Verificar avisos ao navegantes sobre informações de satélites			produção utilizando o MCP						

Figura B1. Análise Preliminar de Perigos (Continuação)

RESIDENCE OF PERSONAL MENTAGEBRO OF CONTROLOGY OF CONTROLO																	
PROVAVIL  TO MANGER PRODUCT PROVAVIL  TO MANGER PROVAVIL PRODUCT PROVAVIL  TO MANGER PROVAVIL PROVAVIL PRODUCT PROVAVIL  TO MANGER PROVAVIL										Abortar operação de amarração							
DESCONERAD salton or grument  The property visual articles di manoricale. Pecchimento do Mangeole possibilidade de lesbes el vers  Traina Giumicho De rando de manorite de l'india de manorite de l'india de contra de l'india de contra de manorite de l'india de granderes de granderes de manorite de l'india de granderes de granderes de manorite de l'india de granderes de manorite de l'india de granderes de granderes de l'india de contra de l'india de contra de l'india de contra de l'india de granderes de l'india de contra d					,				Atraso na operação	do aliviador em relação à unidade de							
all and a service control of coto  all and a service permanente da linha de transmissa de fluido  Torção DO AUNIADOR  SE TRAVA OU NÃO GRA  Torção do mensageiro  PRODUCO PROVÁVEL  (C)  Torção do mensageiro  PRODUCO PROVÁVEL  (D)  Torção do mensageiro  Revisão permanente da linha de restitação de conexão  Torção do servisão permanente do linha de restitação de conexão  Torção peração de conexão  Torção do conexão  Torção de c		17			Falha no grumet		Inspeção visual antes da manobra.		possibilidade de lesões		11	II	II	М	М	м	MÉDIO
TALKA GUNCHO DE PROA DO ALIVIADOR SE TRAVA O UNÃO GIRA Falha sistema hidráulico ou vapor PROVÁVEL (C) Ulitizardo de rotinas de manutenção dos garadores de pressão hidráulica ou de vapor manobra (D) Ulitizardo de rotinas de manutenção dos garadores de pressão hidráulica ou de vapor manobra (D) Ulitizardo de rotinas de manutenção dos garadores de pressão hidráulica ou de vapor manobra (D) Univario de rotinas de manutenção dos garadores de pressão hidráulica ou de vapor manobra (D) Univario de rotinas de manutenção dos garadores de pressão hidráulica ou de vapor manobra (D) Univario de rotinas de manutenção dos garadores de pressão hidráulica ou de vapor manobra (D) Univario de rotinas de manutenção dos garadores de pressão hidráulica ou de vapor manobra (D) Univario de rotinas de manutenção dos garadores de rotinas de rotinas de manutenção dos garadores de rotinas de manutenção dos garadores de rotinas de rotinas de rotinas de rotinas de roti										substituir o mensageiro do mangote e							
1								Incapacidade de		Abortar operação de conexão							
PROVÁVEL X A O  TORÇÃO DO GRUMET  PERDA DA CONEXÃO  Erros na manobra  PROVÁVEL (D)  PROVÁVEL (C)  PR		18		SE TRAVA OU NÃO GIRA		(C)	manutenção dos geradores de	recebimento do		Aguardar a realização de manutenção	-	1	I	Т	Т	Т	TOLERÁVEL
Erros na manobra  Erros na manobra  Decidina hidráulico ou mecânico  POUCO PROVÁVEL  (C)  FALHA NA GARRA  NÃO ABRE OU NÃO  FECHA  POUCO PROVÁVEL  (C)  Falha na manutenção dos geradores de pressão hidráulica ou de vapor  FALHA NA VÁLVULA DE ACOUPLE ALVIEJ DA UNIDADE DE PRODUÇAO ou ALIVIADOR  PRODUÇAO ou ALIVIADOR  PRESSÃO  FALHA NO TESTE DE PRESSÃO  FALHA NO TESTE DE PRESSÃO  SAÍDA  PROVÁVEL  (D)  PROVÁVEL  (D)  PROVÁVEL  (D)  Verificar val vula a e linha de vitansmissão de fluido  Incapacidade de realização da conexão  Altraso na operação leve, com possibilidade de vagarento caso a operação possibilidade de vagarento caso a operação prossiga  Abortar operação de conexão  I I I I I M M M M M M M M M M M M M M	N	19	.9 TORÇÃO DO GRUMET PERDA	PERDA DA CONEXÃO	Torção do mensageiro	PROVÁVEL	manobra e/ou adestrar tripulação				_	1	_	т	т	т .	TOLERÁVEL
Dumerânico  POUCO PROVÁVEL (C)  FALHA NA GARRA  POUCO PROVÁVEL (C)  Utilização de rotinas de manutenção dos geradores de pressão hidráulica ou de vapor  FALHA NA VÁLVULA DE ACOPLAMENTO (COUPLE VALVE) DA UNIDADE DE PRODUÇAO ou ALIVIADOR  FALHA NO TESTE DE PRESSÃO  PRESSÃO  PRESSÃO  PRESSÃO  PROVÁVEL (D)  Utilizar rotinas de manutenção  (check list de atividades)  Verificar anel vedação  Verificar anel vedação  Verificar valvula e linha de  Verificar val	X Ã		, , , , , , ,		Erros na manobra		-	realização da conexão	leve								
FALHA NA GARRA  FECHA  Falha na manutenção  (C)  Utilização de rotinas de manutenção dos geradores de pressão hidráulica ou de vapor  FALHA NA VÁLVULA DE ACOPLAMENTO  (COUPLE VALVE) DA UNIDADE DE PRODUÇAO ou ALIVIADOR  ALIVIADOR  FALHA NO TESTE DE PRESSÃO  FALHA NO TESTE DE PRESSÃO  EVALUA DE ACOPLAMENTO OU ALIVIA DE ACOPLA DE PRESSÃO ENTRE A ENTRADA E A SAÍDA  Vazamento mangote ou acouple valve  OU Varificar valvula de linha de  Vazamento mangote ou acouple valve  OVERTÍCAR VEL  Utilizar rotinas de manutenção régidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)  Verificar anel vedação  Verificar valvula de manutenção régidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)  OVERTÍCAR VEL  Aguardar a realização de manutenção leve, com possibilidade de vazamento caso a operação prossiga  Aguardar a realização de conexão  OVERTÍCAR DE PRESSÃO  ENTRE A ENTRADA E A SAÍDA  Vazamento mangote ou a couple valve  OVERTÍCAR VEL  Atraso na operação de conexão  I I I II M M M M M MÉDIO  Atraso na operação de conexão  Incapacidade de realização de manutenção eleve, com possibilidade de vazamento caso a operação de conexão  OVERTÍCAR VEL  COPUTA VEL  A BORDA COP										Abortar operação de conexão							
ACOPLAMENTO (COUPLE VALVE) DA UNIDADE DE PRODUÇAD OU ALIVIADOR  FALHA NO TESTE DE PRESSÃO  PRESSÃO  DIFERENCIA DE PRESSÃO  Vazamento mangote ou na couple valve  Vazamento mangote ou na couple valve  Verificar válvula e linha de		20	FALHA NA GARRA		Falha na manutenção	(C)	manutenção dos geradores de			Aguardar a realização de manutenção	1	I	_	Т	T	Т	TOLERÁVEL
PRODUÇÃO ou ALIVIADOR Solenóide Verificar anel vedação operação prossiga Aguardar a realização de manutenção de manutenção rigidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades) Incapacidade de realização da operação leve, com possibilidade de vazamento caso a operação prossiga Afraso na operação de conexão Li Verificar válvula e linha de Verificar válvula e linha de vazamento caso a operação prossiga		21	ACOPLAMENTO (COUPLE VALVE) DA			FREQÜENTE	rígidas, com a utilização de roteiros		leve, com possibilidade de	Abortar operação de conexão	1	1	п	М	м	м	MÉDIO
FALHA NO TESTE DE PRESSÃO  FALHA NO TESTE DE PRESSÃO  FALHA NO TESTE DE PRESSÃO  ENTRE A ENTRADA E A SAÍDA  Vazamento mangote ou na couple valve  (D)  FALHA NO TESTE DE PROVÁVEL  (C)  FALHA NO TESTE DE PROVÁVEL  (D)  FALHA NO TESTE DE PROVÁVEL  FIGIDAS, com a utilização de roteiros (check list de atividades)  FROVÁVEL  FIGIDAS, com a utilização de roteiros (check list de atividades)  FROVÁVEL  FROVÁVEL  FIGIDAS, com a utilização de roteiros (check list de atividades)  FROVÁVEL			,		Solenóide		Verificar anel ve dação			Aguardar a realização de manutenção							
22 FALHA NO TESTE DE PRESSÃO PRESSÃO ENTRE A ENTRADA E A SAÍDA SAÍDA Verificar válvula e linha de Verificar válvula e									Atraso na operação	Refazer teste							
Verificar válvula e linha de Verificar válvula e linha de ottloading vazamento caso a operação prossiga		22		ENTRE A ENTRADA E A		-	,	realização da operação	possibilidade de		1	ı	П	т	Т	м	MÉDIO
				SAIDA			Verificar valvula e linha de	lde ottloading		,							

Figura B1. Análise Preliminar de Perigos (Continuação)

Α.	
2	
~	
É	
_	
S	
H	
_	
Ř	
H	
=	
7.	
$\rightarrow$	
$\stackrel{>}{\sim}$	
$\equiv$	
⋖	
4	
$\sim$	
D	
Ē	
-	
U	
Ħ	
$\Xi$	
$\approx$	
C)	
ä	
$\approx$	
0,	
F	
~	
=	
72	
$\mathbf{A}$	
~	
4	
0	
E	
$\lesssim$	
Š	
·. ·	
1	
0	
L	
E	
$\overline{}$	
2	
Ŧ	
7	
Ò	
$\sim$	
Ð	
$\simeq$	
×	
N	
N	
N	
N	

	23	EXECUÇÃO DE MANOBRAS ARRISCADAS	DEVIDO A PRESSÃO COMERCIAL PARA AMARRAR O NAVIO A FIM DE EVITAR PARADA DE PRODUÇÃO	Falha da programação em programar o navio. Erro de julgamento da manobra	FREQÜENTE (E)	Programar o navio com antecedência de 48 h antes do inicio da operação de offloading	Sobrecarga no MCP e no DP	Possibilidade de colisão com impacto alto, seguida de incêndio em condição ambiental desfavorável	Solicitar auxílio de rebocador	IV	IV	IV	NT N	T NT	NÃO TOLERÁVEL
		MUDANÇA DAS	MUDANÇA DE	Erro de avaliação das condições meteorológicas	PROVÁVEL	Observar as condições	Sobrecarga no MCP e no DP	Possibilidade de colisão com impacto alto, seguida de	Abortar operação de aproximação					Ī	NÃO
	24	CONDIÇÕES AMBIENTAIS	FAVORÁVEL PARA DESFAVORÁVEL	Mudança i nesperada das condições ambientais	(D)	meteorológicas antes adentrar área de manobra	O navio pode sair do alinhamento com a unidade de produção	incêndio em condição ambiental desfavorável	Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção	IV	IV	IV	NT N	T NT	TOLERÁVEL
c				Problema thruster		Utilizar rotinas de manutenção rígidas, com a utilização de roteiros	Incapacidade de		Abortar operação de offloading						
N E	25	FALHA SISTEMA DE POCISIONAMENTO	PERDA DA	Falha na manutenção	PROVÁVEL	(check list de atividades)	manutenção de posição	Possibilidade de colisão com impacto	Executar procedimento de desconexão ,		,,,		NT N	TINT	NÃO
X Ã O	23	DINÂMICO	POSIÇÃO	Problemas na geração	(D)	Utilização de rotinas de manutenção dos geradores	Sobre tensão no Hawser	médio, seguido de incêndio	desamarração e de afastamento do aliviador em relação à unidade de		"				TOLERÁVEL
				Problema Satélite GPS		Verificar avisos ao navegantes sobre informações de satélites	Source terrisation of manager		produção utilizando o MCP						
				Falha na manutenção			Falha bombas hidráulicas	Atraso na operação	Abortar operação de offloading						
	26	FALHA M.C.A. DO	PARADA DO SISTEMA	Falta de lubrificação	PROVÁVEL	Utilizar rotinas de manutenção rígidas, com a utilização de roteiro:	5	médio, com possibilidade de	Solicitar embarcação de apoio	۱۱	,,,		NT N	TNT	NÃO
		ALIVIADOR	DIESEL-GERADOR	Falha equipamento	(D)	(check list de atividades)	Falha de equipamento	colisão se o problema persistir	Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção						TOLERÁVEL
				Falha Bomba injetora					Abortar operação de conexão						
	27	FALHA M.C.P. DO ALIVIADOR	PARADA DO MOTOR COMBUSTÃO	Falha no Cilindro	POUCO PROVÁVEL (C)	Utilizar rotinas de manutenção rígidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	s Perda de propulsão	Atraso na operação médio, com possibilidade de colisão se o problema persistir	Solicitar embarcação de apoio  Executar procedimento de desamarração e de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção utilizando o sistema DP	Ш	Ш	ш	М	иМ	MÉDIO

Figura B1. Análise Preliminar de Perigos (Continuação)

	28	QUEDA DE PRESSÃO DURANTE A OPERAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA		Vazamento mangote  Abertura da garra  Interrupção no bombeamento realizado pela unidade	POUCO PROVAVEL	Utilizar rotina de manutenção e chek list antes de iniciar a operação de Offloading	Interrupção ou redução na vazão de óleo recebida	Atraso na operação moderado Possibilidade de vazamento	Ativar sistema de parada de emergência da transferência e identificar causas Se houver vazamento chamar o barco de manutenção e lavar a linha para	II	11	Ш	М	М	М	MÉDIO
				de produção  Operação incorreta de				Ruptura do mangote	desconectar o mangote  Interromper operação de transferência, ativar sistema de parada de emergência da transferência e identificar causas							
T R	29	ELEVAÇÃO DE PRESSÃO NA LINHA EM FUNÇÃO DE FALHA HUMANA	ERRO DE OPERAÇÃO, HUMANA	válvulas do sistema de transferência do aliviador	POUCO PROVÁVEL (C)	Verificar couple valve e válvulas dos tanques de carga se estão fechadas	Interrupção ou redução na vazão de óleo recebida	Atraso na operação severo, com possibilidade de vazamento caso a operação prossiga	Se houver vazamento lavar a linha para desconectar o mangote e chamar o barco de manutenção	П	III	Ш	М	М	М	MÉDIO
A N S F	ELEVAÇÃO DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DE FALHA 30 NO SISTEMA DE		Falha no Vent Post e				Vazamento severo caso ruptura dos tanques	Interromper operação de transferência, ativar sistema de parada de emergência da transferência e identificar causas								
R Ê N C	30		OBSTRUÇÃO NA LINHA DE RECEBIMENTO	no vacum breaker dos tanques do aliviador	REMOTA (B)	Utilizar rotinas de inspeção e manutenção periódica	Possibilidade de Ruptura dos tanques do aliviador	Possibilidade de incêndio caso ruptura dos tanques	Realizar manutenção a bordo do aliviador, se houver ruptura dos tanques desamarrar e desconectar em emergência	IV	IV	IV	M	М	М	MÉDIO
A				Falha na operação do				Vazamento severo com possibilidade de	Interromper operação de transferência, ativar sistema de parada de emergência da transferência e identificar causas							
	31	VAZAMENTO NOS TANQUES DO ALIVIADOR	CARREGAMENTO ALÉM DE 98% DA CAPACIDADE DO TANQUE	sistema de recebimento da carga no aliviador		Efetuar check-list operacional antes início offloading. Cumprir fielmente o plano de carga.	Vazamento	incêndio	Realizar procedimento para contenção do vazamento	IV	IV	IV	М	М	М	MÉDIO
								Possibilidade de incêndio caso ruptura dos tanques	Realizar procedimento de verificação / manutenção do sistema de recebimento da carga							
		ADEDTUDA DO		Falha mecânica				Atraso na operação	Interromper operação de transferência							
	32	ABERTURA DO MORDENTE DO ALIVIADOR	DESAMARRAÇÃO DO NAVIO	Falha no sistema hidráulico do comando	POUCO PROVÁVEL (C)	Utilizar rotinas de inspeção e manutenção periódica	Desconexão do Hawser	severo, com possibilidade de colisão caso a operação prossiga	Desconectar mangote Executar procedimento de amarração	Ш	III	III	М	М	М	MÉDIO

Figura B1. Análise Preliminar de Perigos (Continuação)

	33	ABERTURA DAS GARRAS	DESCONEXÃO DO MANGOTE	Problema hidráulico ou mecânico Falha na manutenção	POUCO PROVÁVEL (C)	Utilizar rotinas rígidas de manutenção, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	Incapacidade de realização da transferência	Atraso na operação severo, com possibilidade de vazamento caso a operação prossiga	Interromper operação de transferência e identificar causas Aguardar a realização de manutenção ou realizar procedimento de desamarração e afastamento.	1	III	Ш	Т	М	М	MÉDIO
-	34	FECHAMENTO DA COUPLE VALVE OU DA INBOARD VALVE DO ALIVIADOR EM FUNÇÃO DE FALHA HI IMANA	ERRO DE OPERAÇÃO, HUMANA	Operação incorreta de válvulas do sistema de transferência do aliviador	POUCO PROVÁVEL (C)	Utilizar rotinas rígidas de manutenção, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	Incapacidade de realização da transferência	Atraso na operação moderado	Interromper operação de transferência Realizar rotina de procedimento de abertura novamente	1	II	II	т	М	М	MÉDIO
T R A	35	HUMANA FECHAMENTO DA COUPLE VALVE OU DA INBOARD VALVE DO ALIVIADOR EM FUNÇÃO DE FALHA NO SISTEMA DE TRANSEERÂNCIA DO	FALHA NO EQUIPAMENTO	Problema no sistema de controle da válvula Falha no sistema hidráulico do comando	POUCO PROVÁVEL (C)	Utilizar rotinas rígidas de manutenção, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	Incapacidade de realização da transferência	Atraso na operação moderado	Interromper operação de transferência Aguardar a realização de manutenção	1	Ш	11	т	М	М	MÉDIO
N S F E R Ê N C	36	SOBRE TENSÃO NO HAWSER	RUPTURA OU DESCONEXÃO	Condições ambientais desfavoráveis	POUCO PROVÁVEL (C)	Não há	Ruptura do hawser	Possibilidade de vazamento	Interromper operação de transferência Executar procedimento de desconexão, desamarração e de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção (Ativar sistema de arada de emergência da transferência) Aguardar a substituição do Hawser	ш	ш	Ш	М	М	М	MÉDIO
	37	EXECUÇÃO DE MANOBRAS ARRISCADAS	DEVIDO A PRESSÃO COMERCIAL PARA AMARRAR O NAVIO A FIM DE EVITAR PARADA DE PRODUÇÃO	Falha da programação em programar o navio. Erro de julgamento da manobra	FREQÜENTE (E)	Programar o navio com antecedência de 48 h antes do inicio da operação de offloading	Sobrecarga no MCP e no DP	Possibilidade de colisão com impacto alto, seguida de incêndio em condição ambiental desfavorável	Solicitar auxílio de rebocador	IV	IV	IV	NT	NT	NT	NÃO TOLERÁVEL
	38	MUDANÇA DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS	MUDANÇA DE FAVORÁVEL PARA DESFAVORÁVEL	Erro de avaliação das condições meteorológicas Mudança inesperada das condições ambientais	PROVÁVEL (D)	Observar as condições meteorológicas antes adentrar área de manobra	Sobrecarga no MCP e no DP  O navio pode sair do alinhamento com a unidade de produção	Possibilidade de colisão com impacto alto, seguida de incêndio em condição ambiental desfavorável	Abortar operação de aproximação  Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção	IV	IV	IV	NT	NT	NT	NÃO TOLERÁVEL

Figura B1. Análise Preliminar de Perigos (Continuação)

				Falha na manutenção			Falha bombas hidráulicas  Atraso na operação  médio, com	Abortar operação de offloading								
		FALHA M.C.A. DO	PARADA DO SISTEMA	Falta de lubrificação	PROVÁVEL	Utilizar rotinas de manutenção		médio, com	Solicitar embarcação de apoio							NÃO
T R	39	ALIVIADOR	DIESEL-GERADOR	Falha equipamento	(D)	(D) (check list de atividades)		possibilidade de colisão caso a operação prossiga	Executar procedimento de desconexão, desamarração e de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção (Ativar sistema de parada de emergência da transferência)	III	III		NT	NT	NT	TOLERÁVEL
A N S F				Falha Bomba injetora		Utilizar rotinas de manutenção		Atraso na operação médio, com	Abortar operação de offloading Solicitar embarcação de apoio							
E R Ê N C	40	FALHA M.C.P. DO ALIVIADOR	PARADA DO MOTOR COMBUSTÃO	Falha no Cilindro	POUCO PROVÁVEL (C)	rígidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	Perda de propulsão	possibilidade de colisão se o problema persistir	Executar procedimento de desconexão , desamarração e de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção utilizando o sistema DP	Ш	III	III	М	М	м	MÉDIO
^				Problema thruster		Utilizar rotinas de manutenção	Incapacidade de		Abortar operação de offloading							
		FALHA SISTEMA DE	PERDA	Falha na manutenção	PROVÁVEL	rígidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	manutenção de posição	Possibilidade de colisão com impacto								NÃO
	41	POCISIONAMENTO DINÂMICO	DA POSIÇÃO	Problemas na geração	(D)	Utilização de rotinas de manutenção dos geradores		médio, seguido de incêndio	Executar procedimento de desconexão , desamarração e de afastamento do aliviador em relação à unidade de	Ш	III	Ш	NT	NT	NT	TOLERÁVEL
				Problema Satélite GPS		Verificar avisos ao navegantes sobre informações de satélites	Sobre tensão no Hawser		produção utilizando o MCP							
D D E E S S	42	FALHA NA OPERAÇÃO DO SISTEMA DE RECEBIMENTO DA CARGA	ERRO DE OPERAÇÃO, NA OPERAÇÃO DE LAVAGEM DO MANGOTE	Falha na operação do sistema de recebimento da carga no aliviador	REMOTA (B)	Rever procedimentos de manutenção.	Contaminação da carga com água	Não há	Interromper operação de lavagem do mangote para realinhamento das válvulas	1	1	1	Т	т	т	TOLERÁVEL
C A O M N A E R X R à A	43	FALHA HUMANA NA OPERAÇÃO DE RECOLHIMENTO DO MANGOTE	MENSAGEIRO DO MANGOTE NÃO CONECTADO NO GUINCHO DE PROA DO ALIVIADOR	Liberação descontrolada do mensageiro do mangote	PROVÁVEL (D)	Rever procedimentos antes da manobra	Possibilidade de acidente envolvendo tripulantes	Mangote abandonado no mar	Solicitação de embarcação de apoio para recolhimento do mangote	Ш	II	II	NT	М	М	NÃO TOLERÁVEL
O Ç Ã E O	44	FALHA HUMANA NA OPERAÇÃO DE RECOLHIMENTO DO HAWSER	MENSAGEIRO DO HAWSER NÃO CONECTADO NO GUINCHO DE PROA DO ALIVIADOR	Liberação descontrolada do mensageiro do hawser	PROVÁVEL (D)	Rever procedimentos antes da manobra	Possibilidade de acidente envolvendo tripulantes	Hawser abandonado no mar	Solicitação de embarcação de apoio para recolhimento do hawser	Ш	Ш	II	NT	NT	М	NÃO TOLERÁVEL

Figura B1. Análise Preliminar de Perigos (Continuação)

	45	FALHA GUINCHO DE PROA DO ALIVIADOR	SE TRAVA OU NÃO GIRA	Falha na alimentação vapor ou pressão hidráulica Falha mecânica	POUCO PROVÁVEL (C)	Revisão permanente da linha de transmissão de fluído Utilização de rotinas de manutenção dos geradores de pressão hidráulica ou de vapor	Não permite a liberação do mensageiro	Atraso na operação leve	Interromper a operação de desconexão ou desamarração até a realização da manutenção	ı	ı	ı	Т	т	TOLERÁVEL
D				Falha na manutenção Falta de lubrificação		Utilizar rotinas de manutenção	Falha bombas hidráulicas	Possibilidade de	Realizar operação de desconexão de emergência Solicitar embarcação de apoio						
E S C O N	46	FALHA M.C.A. DO ALIVIADOR	PARADA DO SISTEMA DIESEL-GERADOR	Falha equipamento	PROVÁVEL (D)	rígidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	Falha de equipamento	colisão com impacto médio, seguido de incêndio	Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção, usando os thruster que tem geração independente	Ш	III	Ш	NT	NT N	NÃO TOLERÁVEL
E X Ã				Falha Bomba injetora				Atraso na operação	Realizar operação de desconexão de emergência Solicitar embarcação de apoio						
O E D	47	FALHA M.C.P. DO ALIVIADOR	PARADA DO MOTOR COMBUSTÃO	Falha no Cilindro	POUCO PROVÁVEL (C)	Utilizar rotinas de manutenção rígidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	Perda de propulsão	médio, com possibilidade de colisão se o problema persistir	Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção utilizando o sistema DP	Ш	III	Ш	М	M	MÉDIO
S A M		FALHA SISTEMA DE	PERDA	Problema thruster Falha na manutenção		Utilizar rotinas de manutenção rígidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)		Possibilidade de	Realizar operação de desconexão de emergência						
A R R	48	POCISIONAMENTO DINÂMICO	DA POSIÇÃO	Problemas na geração	PROVÁVEL (D)	Utilização de rotinas de manutenção dos geradores	Incapacidade de manutenção de posição	colisão com impacto médio, seguido de incêndio	Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de	Ш	Ш	ш	NT	NT N	NÃO TOLERÁVEL
A Ç				Problema Satélite GPS		Verificar avisos ao navegantes sobre informações de satélites			produção utilizando o MCP						
Ã O	49	EXECUÇÃO DE MANOBRAS	DEVIDO A PRESSÃO COMERCIAL PARA AMARRAR O NAVIO A	Falha da programação em programar o navio.	FREQÜENTE (E)	Programar o navio com antecedência de 48 h antes do	Sobrecarga no MCP e no	Possibilidade de colisão com impacto alto, seguida de incêndio em condição	Solicitar auxílio de rebocador	IV	IV	IV	NT	NT N	NÃO TOLERÁVEL
		ARRISCADAS	FIM DE EVITAR PARADA DE PRODUÇÃO	Erro de julgamento da manobra	(E)	inicio da operação de offloading	lDP	ambiental desfavorável	o Solicitar auxilio de redocador						TOLERAVEL
	50	MUDANÇA DAS CONDIÇÕES	MUDANÇA DE FAVORÁVEL PARA	Erro de avaliação das condições meteorológicas	PROVÁVEL	Observar as condições meteorológicas antes adentrar	Sobrecarga no MCP e no DP	Possibilidade de colisão com impacto alto, seguida de	Executar procedimento de afastamento	IV	IV	IV.	NT	NT N	, NÃO
	50	AMBIENTAIS	DESFAVORÁVEL	Mudança i nesperada das condições ambientais	(D)	área de manobra	O navio pode sair do alinhamento com a unidade de produção	incêndio em condição ambiental desfavorável		IV	IV	IV	INT	N N	TOLERÁVEL

Figura B1. Análise Preliminar de Perigos (Continuação)

2
1
8

	51	FALHA M.C.A. DO ALIVIADOR	PARADA DO SISTEMA DIESEL-GERADOR	Falha na manutenção Falta de lubrificação Falha equipamento	PROVÁVEL (D)	Utilizar rotinas de manutenção rigidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	Falha bombas hidráulicas Falha de equipamento	Possibilidade de colisão com impacto médio, seguido de incêndio	Solicitar embarcação de apoio Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção	Ш	III	Ш	NT	NT	NÃO TOLERÁVEL
				Falha Bomba injetora	,	Utilizar rotinas de manutenção rígidas, com a utilização de roteiros f (check list de atividades)		Possibilidade de	Solicitar embarcação de apoio						
	52	FALHA M.C.P. DO ALIVIADOR	PARADA DO MOTOR COMBUSTÃO	Falha no Cilindro	POUCO PROVÁVEL (C)			colisão com impacto médio, seguido de incêndio	Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção utilizando o sistema DP	≡	Ξ	Ш	M	М	M MÉDIO
				Problema thruster		Utilizar rotinas de manutenção rígidas, com a utilização de roteiros	Capacidade limitada para realizar a operação de afactamento	ção de colisão com impacto do							
A	53	FALHA SISTEMA DE POCISIONAMENTO	PERDA DA POSIÇÃO	Falha na manutenção	PROVÁVEL	(check list de atividades)			Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção utilizando o MCP e thrusters		Ш	Ш	NT	NT NT	NÃO
A S		DINÂMICO		Problemas na geração	(D)	Utilização de rotinas de manutenção dos geradores									TOLERÁVEL
T A				Problema Satélite GPS		Verificar avisos ao navegantes sobre informações de satélites									
M E N T	54	EXECUÇÃO DE MANOBRAS	DEVIDO A PRESSÃO COMERCIAL PARA AMARRAR O NAVIO A	Falha da programação em programar o navio.	FREQÜENTE	lantecedencia de 4X h antes do	Sobrecarga no MCP e no	Possibilidade de colisão com impacto alto, seguida de	Solicitar auxílio de rebocador	IV	IV	IV	NT	NT I	NÃO
0	34	ARRISCADAS	FIM DE EVITAR PARADA DE PRODUÇÃO	Erro de julgamento da manobra	(E)		DP	incêndio em condição ambiental desfavorável	Johann daxiio de resocutor						TOLERÁVEL
		MUDANÇA DAS	MUDANÇA DE	Erro de avaliação das condições meteorológicas	ppovávs	Observar as condições	Sobrecarga no MCP e no DP	Possibilidade de colisão com impacto	Abortar operação de aproximação						w
	55	CONDIÇÕES AMBIENTAIS	FAVORÁVEL PARA DESFAVORÁVEL	Mudança i nesperada das condições ambientais	PROVÁVEL (D)	meteorológicas antes adentrar área de manobra	O navio pode sair do alinhamento com a unidade de produção	alto, seguida de incêndio em condição ambiental desfavorável	Executar procedimento de afastamento do aliviador em relação à unidade de produção	IV	IV	IV	NT	NT I	TOLERÁVEL
	56	GOVERNO	INCAPACIDADE DE OPERAR O SISTEMA DE GOVERNO DO NAVIO	Falha na manutenção	POUCO PROVÁVEL (C)	Utilizar rotinas de manutenção rígidas, com a utilização de roteiros (check list de atividades)	Navio aliviador sem governo	Possibilidade de colisão com impacto médio, seguido de incêndio	Solicitar o rebocador para afastar o navio das proximidades do terminal	II	==	Ш	М	М	M MÉDIO

C.E. Patino Rodriguez – ANÁLISE DE RISCO EM OPERAÇÕES DE "OFFLOADING" – UM MODELO DE AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DINÂMICA PARA A TOMADA DE DECISÃO

Figura B1. Análise Preliminar de Perigos (Continuação)

# APÊNDICE C CÁLCULO DE PROBABILIDADE DO EVENTO DE PERIGO: FALHA NO MCP

Para calcular a probabilidade do evento de perigo "Falha no MCP" foram usadasas taxas de falha,  $E[P_0(\lambda)]$ , e o desvio padrão,  $\sigma[P_0(\lambda)]$ , para os eventos básicos da árvore de falha, mostrados na Figura 5.16, foram selecionadas das bases de dados NPRD, (1995); LEE, (1996); SMITH, (2000); OREDA, (2002). A partir destes dados selecionou-se a distribuição Gama como uma apropriada distribuição a priori e usando a eq. (5.2) bem como o procedimento explicado em detalhe na secção 5.3 encontrou-se que a média da taxa de falha a posteriori,  $P(\lambda | E)$ , para todos os eventos básicos e são apresentados nas Tabelas C.1 à C.7.

Assim, usando as probabilidades *a posteriori* como entradas e considerando independência entre os eventos foi calculada a probabilidade de falha de cada subsistema do MCP, estes cálculos foram realizados para um tempo de 43800 horas, usando o programa Saphire (SAPHIRE, 1997). Os resultados são apresentados na Tabela C.8.

Tabela C.1. Taxas de falha e Desvio Padrão para Eventos Básicos da Falha do Sistema de Resfriamento (NPRD, 1995; LEE, 1996; SMITH, 2000; OREDA, 2002).

Equipamento	$\frac{\mathrm{E}[\mathrm{P}_0(\pmb{\lambda})]}{[\mathrm{falha/h}]}$	$\sigma[P_0(\lambda)]$ [falha/h]	Ρ(λΙΕ)	Equipamento	$\frac{\mathrm{E}[\mathrm{P}_0(\lambda)]}{[\mathrm{falha/h}]}$	$\sigma[P_0(\pmb{\lambda})]$ [falha/h]	Ρ[λΙΕ]
Bomba abastecimento	7.36E-04	1.20E-04	3.95E-04	Tubulação (Ruptura)	3.70E-07	6.18E-07	3.54E-07
Motor Bomba	1.13E-04	2.81E-05	8.62E-05	Trocador de Calor	3.30E-05	3.30E-05	1.35E-05
Tubulação (Vazamento)	4.40E-07	9.57E-07		Trocador de Calor (Obstrução)	2.34E-04	2.34E-04	2.08E-05

Tabela C.2. Taxas de falha e Desvio Padrão para Eventos Básicos da Falha no Sistema de Água Salgada (NPRD, 1995; LEE, 1996; SMITH, 2000; OREDA, 2002).

Equipamento	$\frac{\mathrm{E}[P_0(\pmb{\lambda})]}{[\mathrm{falha/h}]}$	$\begin{array}{c} \sigma[P_0(\pmb{\lambda})] \\ [falha/h] \end{array}$	Ρ(λΙΕ)	Equipamento	$\frac{E[P_0(\lambda)]}{[falha/h]}$		Ρ[λΙΕ]
Filtro	2.00E-06	2.00E-06	1.84E-06	Caixa de Água	2.13E-04	2.13E-04	2.06E-05
Bomba abastecimento	7.36E-04	1.20E-04	3.95E-04	Motor Bomba	1.13E-04	2.81E-05	8.62E-05
Tubulação (Ruptura)	3.70E-07	6.18E-07	3.54E-07	Tubulação	4.40E-07	9.57E-07	4.03E-07
				(Vazamento)			

Tabela C.3. Taxas de falha e Desvio Padrão para Eventos Básicos da Falha do Sistema de Partida (NPRD, 1995; LEE, 1996; SMITH, 2000; OREDA, 2002).

Equipamento	$\frac{\mathrm{E}[P_0(\lambda)]}{[\mathrm{falha/h}]}$	$\begin{array}{c} \sigma[P_0(\pmb{\lambda})] \\ [\text{falha/h}] \end{array}$	Ρ(λΙΕ)	Equipamento	$\mathrm{E}[\mathrm{P}_0(\lambda)]$ [falha/h]	$\begin{array}{c} \sigma[P_0(\lambda)] \\ [falha/h] \end{array}$	Ρ[λΙΕ]
Tubulação (Ruptura)	3.70E-07	6.18E-07	3.54E-07	Ampolas	4.08E-05	4.08E-05	1.46E-05
				(Vazamento)			
Tubulação	4.40E-07	9.57E-07	4.03E-07	Compressores	1.22E-04	1.22E-04	1.92E-05
(Vazamento)							

Tabela C.4. Taxas de falha e Desvio Padrão para Eventos Básicos da Falha da Perda de Controle de Velocidade (NPRD, 1995; LEE, 1996; SMITH, 2000; OREDA, 2002).

Equipamento	$\frac{\mathrm{E}[P_0(\lambda)]}{[\mathrm{falha/h}]}$	$\sigma[P_0(\lambda)]$ [falha/h]	Ρ(λΙΕ)	Equipamento	$\frac{E[P_0(\lambda)]}{[falha/h]}$	$\sigma[P_0(\lambda)]$ [falha/h]	Ρ[λΙΕ]
Aquecedores	4.54E-05	3.74E-05	1.93E-05	Sedimentação	4.37E-04	6.26E-04	1.08E-05
Bico Injetor (Obstrução)	7.24E-06	1.02E-05	4.43E-06	Sistema VIT	2.06E-07	2.06E-07	2.04E-07
Bico injetor (quebra)	2.00E-07	2.00E-07	1.98E-07	Tanque de retorno	9.50E-06	9.11E-06	6.87E-06
Bomba abastecimento	7.36E-04	1.20E-04	3.95E-04	Tanque de sedimentação	6.26E-05	1.12E-04	6.43E-06
Bomba Centrífuga	7.36E-04	1.20E-04	3.95E-04	Tanque de serviço	9.50E-06	9.11E-06	6.87E-06
Bomba injetora	1.43E-03	1.13E-03	3.55E-05	Tanque principal	2.13E-04	2.13E-04	2.06E-05
Bombas Auxiliares	1.10E-03	1.10E-03	2.24E-05	Tubulação (Obstrução)	3.70E-07	6.18E-07	3.54E-07
Centrífuga	1.69E-05	5.94E-06	1.55E-05	Tubulação (Vazamento)	4.40E-07	9.57E-07	4.03E-07
Eixo de Comando Bomba Injeção	3.00E-05	3.00E-05	1.30E-05	Válvula 3 vias	2.28E-05	1.50E-05	1.59E-05
Filtro	2.00E-06	2.00E-06	1.84E-06	Válvula Bypass	2.28E-05	1.50E-05	1.59E-05
Medidor de fluxo	1.32E-05	3.26E-06	1.27E-05	Válvula Check	3.60E-07	5.10E-07	3.49E-07
Motor Bomba Centrífuga	1.13E-04	2.81E-05	8.62E-05	Válvula reguladora de pressão	8.81E-06	1.25E-05	4.98E-06
Regulador de viscosidade	6.39E-06	8.96E-06	4.12E-06	Sedimentação	4.37E-04	6.26E-04	1.08E-05

Tabela C.5. Taxas de falha e Desvio Padrão para Eventos Básicos da Falha do Sistema de Lubrificação (NPRD, 1995; LEE, 1996; SMITH, 2000; OREDA, 2002).

Equipamento	$\frac{\mathrm{E}[P_0(\lambda)]}{[falha/h]}$	$\begin{array}{c} \sigma[P_0(\lambda)] \\ [falha/h] \end{array}$	Ρ(λΙΕ)	Equipamento	$\frac{\mathrm{E}[\mathrm{P}_0(\lambda)]}{[\mathrm{falha/h}]}$	$\begin{array}{c} \sigma[P_0(\lambda)] \\ [falha/h] \end{array}$	Ρ[λΙΕ]
Bomba abastecimento	7.36E-04	1.20E-04	3.95E-04	Tubulação (Ruptura)	3.70E-07	6.18E-07	3.54E-07
Motor Bomba	1.13E-04	2.81E-05	8.62E-05	Trocador de Calor	3.30E-05	3.30E-05	1.35E-05
Tubulação	4.40E-07	9.57E-07	4.03E-07	Trocador de Calor	2.34E-04	2.34E-04	2.08E-05
(Vazamento)				(Obstrução)			

Tabela C.6. Taxas de falha e Desvio Padrão para Eventos Básicos da Perda de Desempenho (NPRD, 1995; LEE, 1996; SMITH, 2000; OREDA, 2002).

Equipamento	$\mathrm{E}[\mathrm{P}_0(\lambda)]$ [falha/h]	$\sigma[P_0(\lambda)]$ [falha/h]	Ρ(λΙΕ)	Equipamento	$\frac{E[P_0(\lambda)]}{[falha/h]}$	$\sigma[P_0(\lambda)]$ [falha/h]	Ρ[λΙΕ]
Aquecedores	4.54E-05	3.74E-05	1.93E-05	Sedimentação	4.37E-04	6.26E-04	1.08E-05
Bico Injetor (Obstrução)	7.24E-06	1.02E-05	4.43E-06	Sistema VIT	2.06E-07	2.06E-07	2.04E-07
Bico injetor (quebra)	2.00E-07	2.00E-07	1.98E-07	Tanque de retorno	9.50E-06	9.11E-06	6.87E-06
Bomba abastecimento	7.36E-04	1.20E-04	3.95E-04	Tanque de sedimentação	6.26E-05	1.12E-04	6.43E-06
Bomba Centrífuga	7.36E-04	1.20E-04	3.95E-04	Tanque de serviço	9.50E-06	9.11E-06	6.87E-06
Bomba injetora	1.43E-03	1.13E-03	3.55E-05	Tanque principal	2.13E-04	2.13E-04	2.06E-05
Bombas Auxiliares	1.10E-03	1.10E-03	2.24E-05	Tubulação (Obstrução)	3.70E-07	6.18E-07	3.54E-07
Centrífuga	1.69E-05	5.94E-06	1.55E-05	Tubulação (Vazamento)	4.40E-07	9.57E-07	4.03E-07
Eixo de Comando Bomba Injeção	3.00E-05	3.00E-05	1.30E-05	Válvula 3 vias	2.28E-05	1.50E-05	1.59E-05
Filtro	2.00E-06	2.00E-06	1.84E-06	Válvula Bypass	2.28E-05	1.50E-05	1.59E-05
Medidor de fluxo	1.32E-05	3.26E-06	1.27E-05	Válvula Check	3.60E-07	5.10E-07	3.49E-07
Motor Bomba Centrífuga	1.13E-04	2.81E-05	8.62E-05	Válvula reguladora de pressão	8.81E-06	1.25E-05	4.98E-06
Regulador de viscosidade	6.39E-06	8.96E-06	4.12E-06	Sedimentação	4.37E-04	6.26E-04	1.08E-05

Tabela C.7 Taxas de falha e Desvio Padrão para Eventos Básicos da Falha do Sistema de Injeção de Combustível (NPRD, 1995; LEE, 1996; SMITH, 2000; OREDA, 2002).

Equipamento	$\frac{\mathrm{E}[P_0(\lambda)]}{[falha/h]}$	$\sigma[P_0(\lambda)]$ [falha/h]	Ρ(λΙΕ)	Equipamento	$\frac{E[P_0(\lambda)]}{[falha/h]}$	$\sigma[P_0(\lambda)]$ [falha/h]	Ρ[λΙΕ]
Aquecedores	4.54E-05	3.74E-05	1.93E-05	Sedimentação	4.37E-04	6.26E-04	1.08E-05
Bico Injetor (Obstrução)	7.24E-06	1.02E-05	4.43E-06	Sistema VIT	2.06E-07	2.06E-07	2.04E-07
Bico injetor (quebra)	2.00E-07	2.00E-07	1.98E-07	Tanque de retorno	9.50E-06	9.11E-06	6.87E-06
Bomba abastecimento	7.36E-04	1.20E-04	3.95E-04	Tanque de sedimentação	6.26E-05	1.12E-04	6.43E-06
Bomba Centrífuga	7.36E-04	1.20E-04	3.95E-04	Tanque de serviço	9.50E-06	9.11E-06	6.87E-06
Bomba injetora	1.43E-03	1.13E-03	3.55E-05	Tanque principal	2.13E-04	2.13E-04	2.06E-05
Bombas Auxiliares	1.10E-03	1.10E-03	2.24E-05	Tubulação (Obstrução)	3.70E-07	6.18E-07	3.54E-07
Eixo de Comando Bomba Injeção	3.00E-05	3.00E-05	1.30E-05	Tubulação (Vazamento)	4.40E-07	9.57E-07	4.03E-07
Centrífuga	1.69E-05	5.94E-06	1.55E-05	Válvula 3 vias	2.28E-05	1.50E-05	1.59E-05
Filtro	2.00E-06	2.00E-06	1.84E-06	Válvula Bypass	2.28E-05	1.50E-05	1.59E-05
Medidor de fluxo	1.32E-05	3.26E-06	1.27E-05	Válvula Check	3.60E-07	5.10E-07	3.49E-07
Motor Bomba Centrífuga	1.13E-04	2.81E-05	8.62E-05	Válvula reguladora de pressão	8.81E-06	1.25E-05	4.98E-06
Regulador de viscosidade	6.39E-06	8.96E-06	4.12E-06	Sedimentação	4.37E-04	6.26E-04	1.08E-05

Tabela C.8. Cálculo de Probabilidade de Falha dos subsistemas do MCP.

Evento de Falha	Probabilidade
Falha no Sistema de Resfriamento	4.54E-05
Falha no Sistema de Água Salgada	7.24E-06
Falha no Sistema de Partida	2.00E-07
Perda de Controle de Velocidade	7.36E-04
Falha do Sistema de Lubrificação	1.91E-02
Perda de desempenho	1.43E-03
Falha no Sistema de Injeção de Combustível	1.69E-05

Com as probabilidades de falha, de cada um dos eventos de segundo nível, calculadas e usando o fato que a porta lógica que une a falha dos subsistemas à falha do MCP é uma "OU" então a probabilidade de que falhe o MCP em um tempo de 43800 horas é: 0.021.

## APÊNDICE D RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Este apêndice apresenta os gráficos dos resultados das simulações de cada uma das condições. Primeiro se apresenta a condição ambiental e de amarração simulada, posteriormente aparece aovimentação do navio aliviador durante a simulação, e um histograma de frequência referente à posição angular da posição relativa entre o FPSO e o navio aliviador. Na segunda linha dos gráficos aparece o comportamento dos quatro thrusters, e finalmente, na última linha aparece o comportamento da posição no tempo e da tensão no hawser.

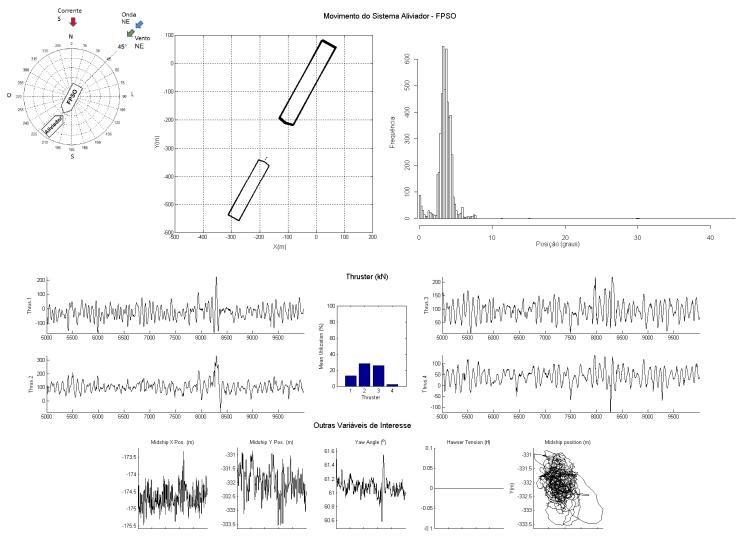


Figura 7.1 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, Navio Alividador (100%), Alívio de Proa, Sem Falhas

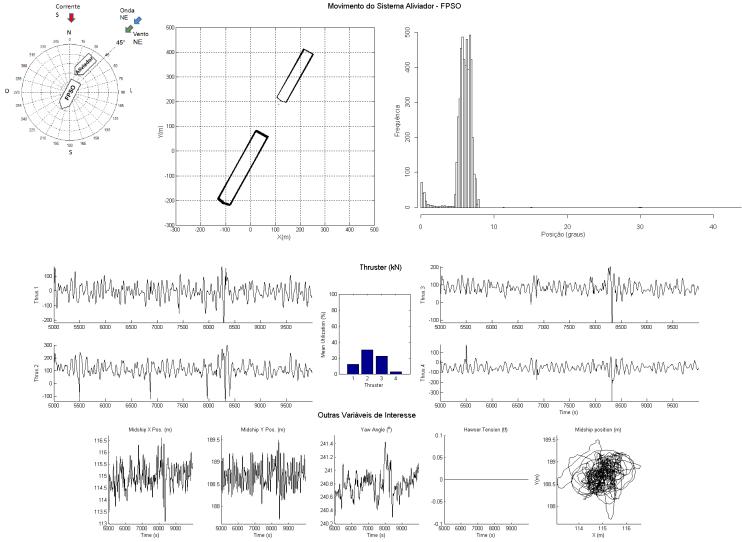


Figura 7.2 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, Navio Alividador (100%), Alívio de Popa, Sem Falhas

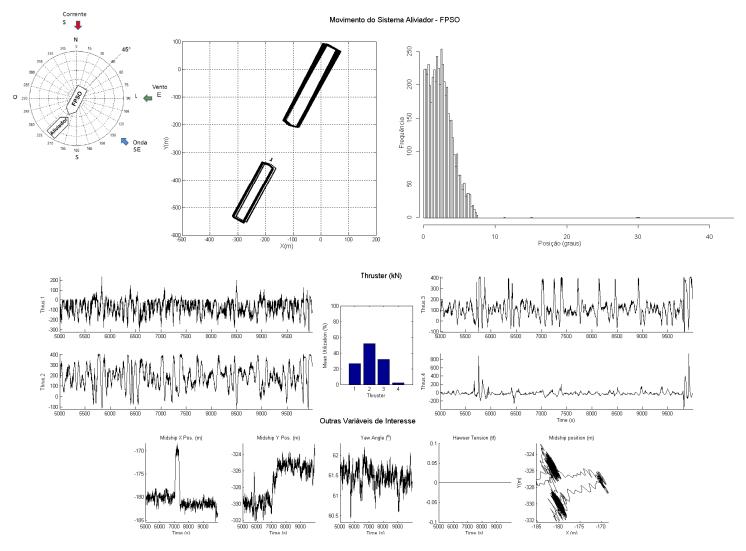


Figura 7.3 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental II, Navio Alividador (100%), Alívio de Proa, Sem Falhas

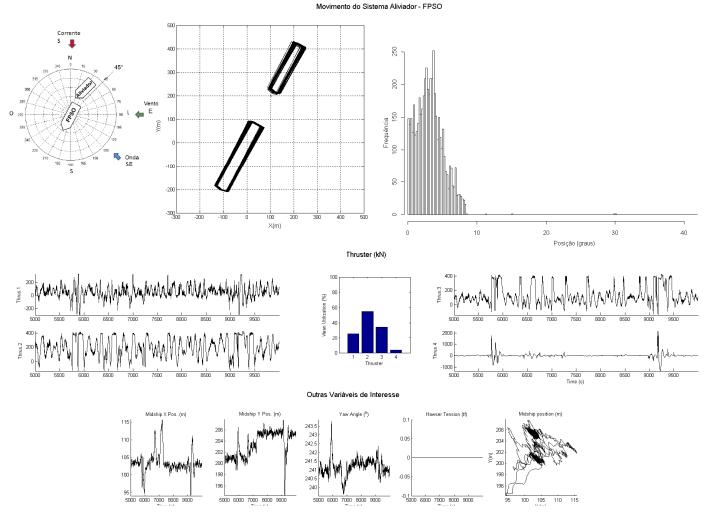


Figura 7.4 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental II, Navio Alividador (100%), Alívio de Popa Sem Falhas

202

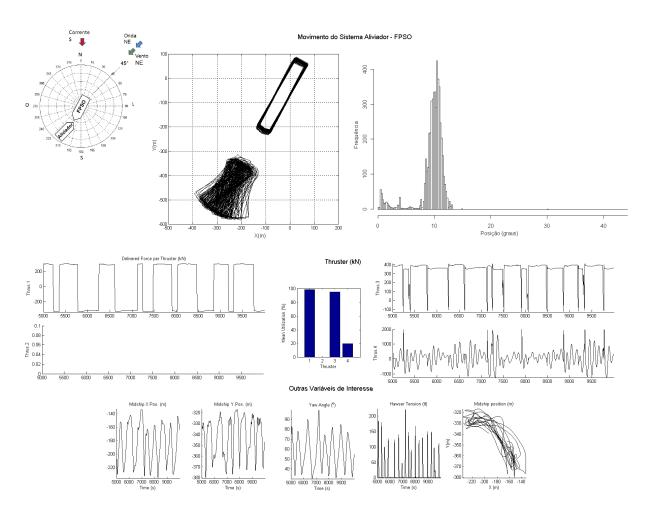


Figura D.1 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, Navio Aliviador (100%), Alívio de Proa, Falha DP

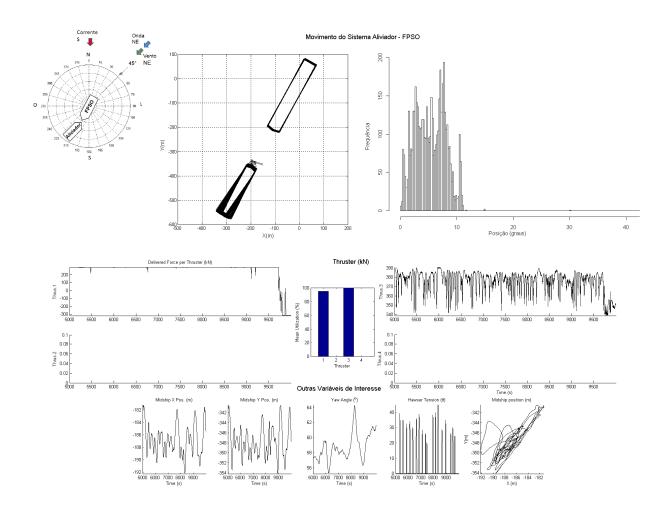


Figura D.2 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, Navio Aliviador (100%), Alívio de Proa, Falha DP e MCP

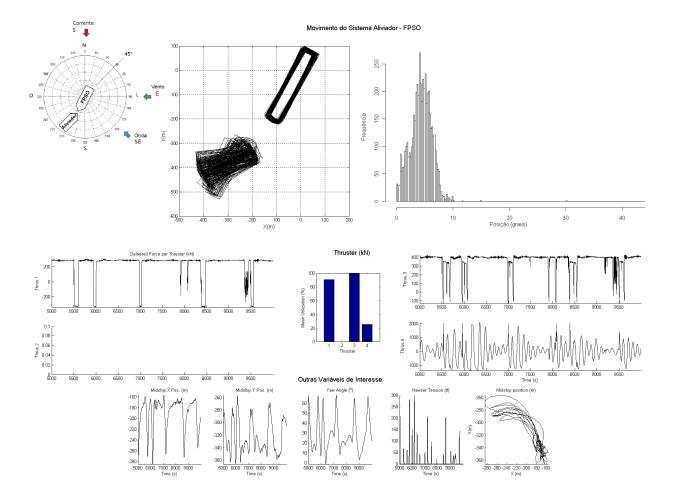


Figura D.3 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental II, Navio Aliviador (100%), Alívio de Proa, Falha DP

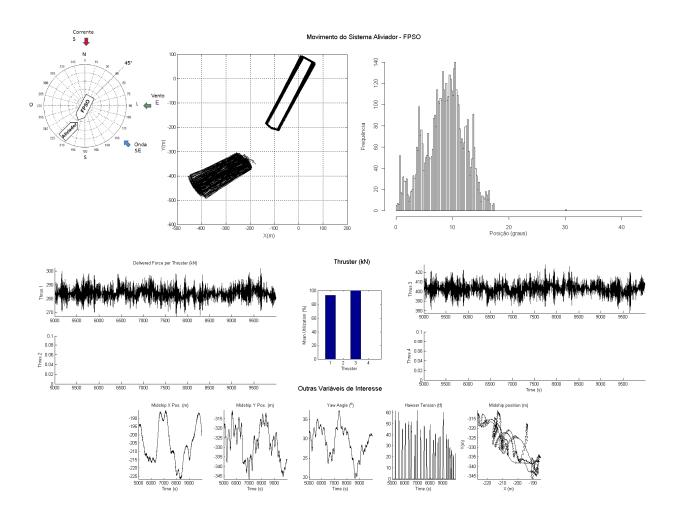


Figura D.4 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental II, Navio Aliviador (100%), Alívio de Proa, Falha DP e MCP



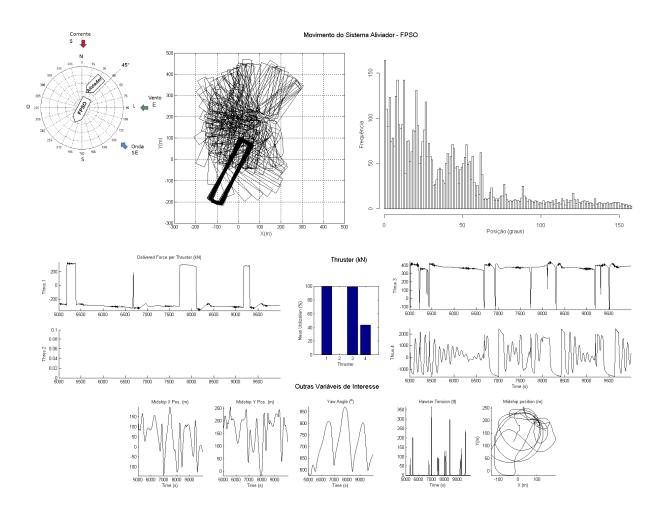


Figura D.5 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, Navio Aliviador (100%), Alívio de Popa, Falha DP

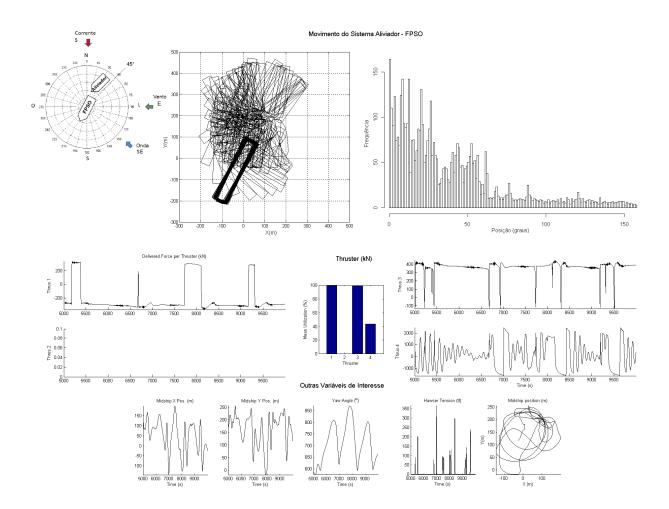


Figura D.5 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental I, Navio Aliviador (100%), Alívio de Popa, Falha DP e MCP

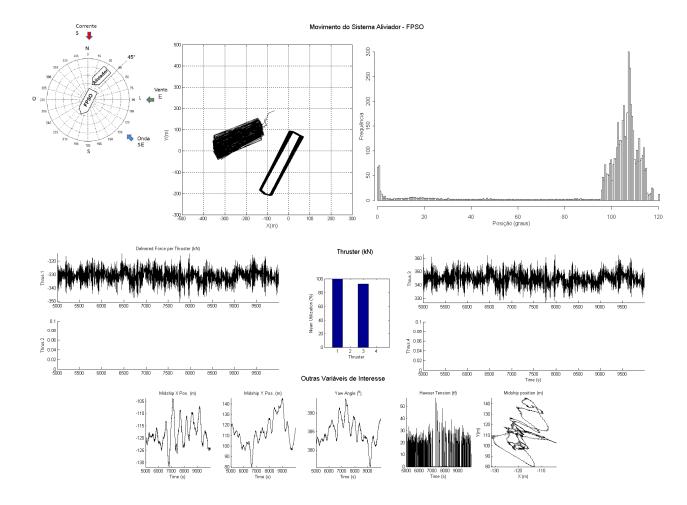


Figura D.6 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental II, FPSO (100%), Alívio de Proa, Falha DP e MCP

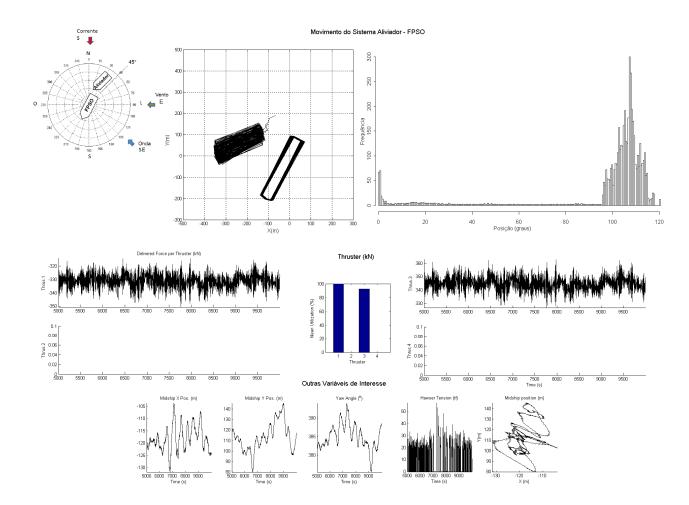


Figura D.6 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental II, FPSO (100%), Alívio de Popa, Falha DP e MCP

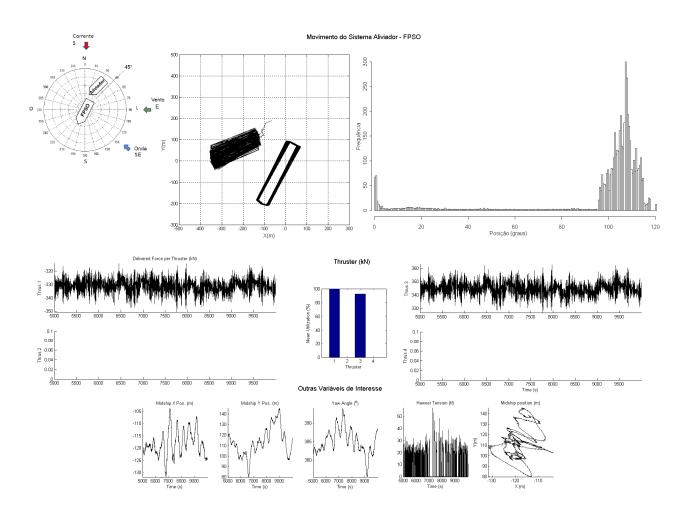


Figura D.6 Comportamento Aliviador-FPSO condição ambiental II, Navio Aliviador (100%), Alívio de Popa, Falha DP e MCP

## E.1. CÓDIGO EM R PARA CALCULAR A DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DO ALIVIADOR ESTAR EM UM ESTADO

```
### Leitura dados ###
FPSO ALIV=read.table('C:/Documents and Settings/IFPSOcheio SemFalha.txt',
header = T)
attach (FPSO_ALIV)
### "Calcular o ângulo entre FPSO e Aliviador ###
X_C1_FPSO=X_C1_FPSO+(160*cos(59.74*pi/180))
Y_C1_FPSO=Y_C1_FPSO+(160*sin(59.74*pi/180))
a=as.matrix(X_C1_FPSO)
b=as.matrix(Y_C1_FPSO)
posFPSO=atan2(b, a)
RaioFPSO=(X_C1_FPSO^2+Y_C1_FPSO^2)^0.5
ProaFPSO=RaioFPSO+160
XProaFPSO=ProaFPSO*cos(posFPSO)
YProaFPSO=ProaFPSO*sin(posFPSO)
c=as.matrix(X C1 ALIV)
d=as.matrix(Y C1 ALIV)
posALIV=atan2(d, c)
RaioALIV=(X_C1_ALIV^2+Y_C1_ALIV^2)^0.5
ProaALIV=RaioALIV-131
XProaALIV=ProaALIV*cos(posALIV)
YProaALIV=ProaALIV*sin(posALIV)
##"Calcular o ângulo entre FPSO E ALIVIADOR > 45° SAI ZONA DE OPERAÇÃO"##
Posiçao=(posFPSO - posALIV)
angFPSO_ALIV= Posiçao*180/pi
angFPSO_ALIV=abs(angFPSO_ALIV[0:2500]-180)
plot(angFPSO_ALIV)
hist(angFPSO_ALIV, main = "Histograma Angulo entre Aliviador e FPSO durante
Alívio Aliviador vazio, FSPO cheio- Condição Ambiental 1, Alívio de Proa",
xlab="Posição (Graus)", ylab="Frequência")
prueba=angFPSO_ALIV
library(MASS)
fitdistr(prueba, "weibull")
a=scale
b=shape
###Teste de bondade de ajuste shape e scale vem do ajuste###
x < -seq(0, 10, 0.1)
plot(x,pweibull(x,scale=a,shape=b),type="l",col="red")
plot(ecdf(prueba),add=TRUE)
ks.test(prueba, "pweibull", shape=a, scale=b)
```

CÓDIGOS EM R E EM MATLAB' 212

## E.2. CÓDIGO E MATLAB PARA CALCULAR A PROBABILIDADE DO ALIVIADOR ESTAR EM UM ESTADO DE OPERAÇÃO

```
clear all
8*********
% Tempo para a Análise
§**********
ti=0;
tf=45;
dt = 0.1;
         *****
Aa = [1; 0];
num_el=(tf-ti)/dt;
Lav=zeros(1, num_el);
Uav=zeros(1, num_el);
A0=zeros(1, num_el);
A1=zeros(1, num_el);
%Variáveis
n=1;
tempo=ti:dt:tf;
for t=ti:dt:tf
tmed=(t+t+dt)/2;
La= 0.024474 * ((tmed)^(0.641165));
Ua= 6.1e-16 * ((tmed)^{(9.997756)});
M=[(1-La*dt) (Ua*dt);
(La*dt) (1-Ua*dt)];
A=M*Aa;
Aa=A;
%Vectores
Lav(n) = La;
Uav(n) = Ua;
A0(n) = A(1);
A1(n) = A(2);
n=n+1;
end
figure
title 'Probabilidade Estado SO'
xlabel 'tempo'
ylabel 'A0'
plot(tiempo, A0);
title 'Probabilidade Estado S1'
xlabel 'tempo'
ylabel 'A1'
plot(tempo, A1);
display 'PROGRAMA FINALIZADO'
clear all
```

#### E.3. CÓDIGO EM MATLAB DE VALIDAÇÃO DO ALGORITMO RECORRENTE

```
clear all
%****************
%   Tempo para a Análise
%************
ti=0;
tf=45;
dt=; %para dt=0.1; dt=1; dt=2; dt=5
```

CÓDIGOS EM R E EM MATLAB'

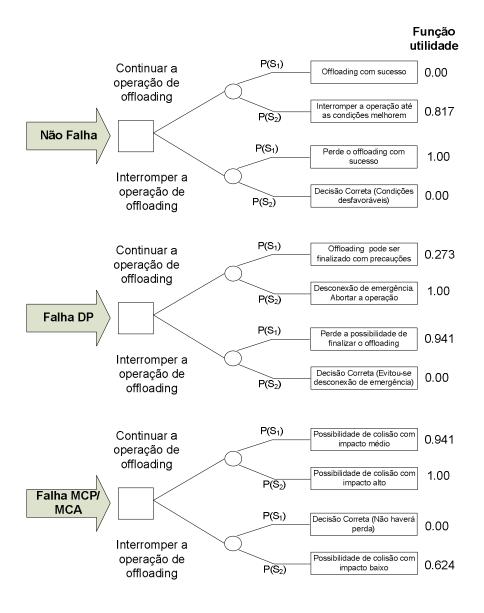
```
escalaL=37158.87;
formaL=1.0;
escalaU=23449.61;
formaU=1.0;
§***********
Aa = [1; 0];
num_el=(tf-ti)/dt;
Lav=zeros(1, num_el);
Uav=zeros(1, num_el);
A0=zeros(1, num_el);
A1=zeros(1, num_el);
P0=zeros(1, num_el);
P1=zeros(1, num_el);
PLav=zeros(1, num_el);
PUav=zeros(1, num_el);
%Variáveis
n=1;
tempo=ti:dt:tf;
for t=ti:dt:tf
tmed=(t+t+dt)/2;
La= (formaL/escalaL) * ((tmed/escalaL)^(formaL-1));
\label{eq:Ua} \mbox{Ua= (formaU/escalaU) $^*$ ((tmed/escalaU) $^*$ (formaU-1)) ;}
M=[(1-La*dt) (Ua*dt);
(La*dt) (1-Ua*dt)];
A=M*Aa;
Aa=A;
%Vectores
Lav(n) = La;
Uav(n) = Ua;
A0(n) = A(1);
A1(n) = A(2);
K = [(1-28.5e-6*dt) (45.4e-6*dt);
(28.5e-6*dt) (1-45.4e-6*dt)];
P=K*Aa;
Aa=P;
%Vectores
PLav(n) = 28.5e-6;
PUav(n) = 45.4e - 6;
P0(n) = P(1);
P1(n) = P(2);
n=n+1;
end
%n=1:50:451 %para dt=0.1
%n=1:50:46 %para dt=1
%n=1:2:23 %para dt=2
%Vectores
H0=A0(n);
H1=A1(n);
W0=P0(n);
W1=P1(n);
x=1:50/12:50
```

CÓDIGOS EM RE EM MATLAB' 214

```
plot(x,H0,'-ro',x,W0,'-.b')
set(gca,'XTickLabel',{'0','5','10','15','20','25','30','35','40','45',''})
xlabel ('\Theta')
ylabel ('Probabilidade de estar em S1')
ylim([0.997 1])
hleg1 = legend('Algoritmo Recorrente','Validação');

x=1:50/12:50
plot(x,H1,'-ro',x,W1,'-.b')
set(gca,'XTickLabel',{'0','5','10','15','20','25','30','35','40','45',''})
xlabel ('\Theta')
ylabel ('Probabilidade de estar em S2')
ylim([0 0.003])
hleg1 = legend('Algoritmo Recorrente','Validação');
```

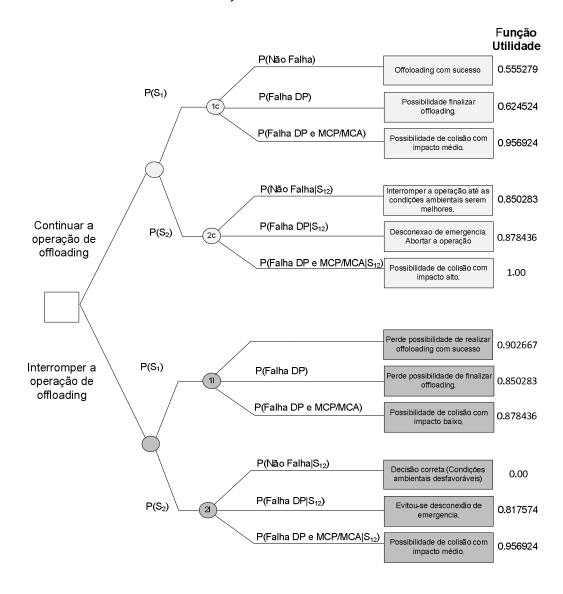
F.1. ÁRVORE DE DECISÃO SOBRE INTERROMPER OU CONTINUAR COM A OPERAÇÃO DE OFFLOADING QUANDO O NAVIO ALIVIADOR ESTÁ FORA DA ÁREA DE OPERAÇÃO E ACONTECE UMA SEQUÊNCIA ACIDENTAL



		IProaC1	IProaC2	IPopaC1	IPopaC2	IIProaC1	IIProaC2	IIPopaC1	IIPopaC2	ESTADO
	CONTINUAR	0.00030332	0.00010792	2.94327E-05	0.171650579	9.81089E-06	0.002103619	7.52169E-05	0.241399493	S1
Sem Falha	INTERROMPER	0.999629	0.999868	0.999964	0.790049	0.999988	0.997427	0.999908	0.704736	\$2 \$1
	DECISAO	CONTINUAR	S2							
	CONTINUAR	0.272795969	0.27282415	0.790134324	0.684281894	0.273149407	0.272848331	0.598413969	0.555024029	\$1 \$2
Falha DP	INTERROMPER	0.941429757	0.94140622	0.271689627	0.408724935	0.940972201	0.941361971	0.519888537	0.576060642	S1
	DECISAO	CONTINUAR	CONTINUAR	INTERROMPER	INTERROMPER	CONTINUAR	CONTINUAR	INTERROMPER	CONTINUAR	S2
	CONTINUAR	0.941474123	0.941476113	0.998634584	0.997947142	0.947297108	0.941483716	0.997922971	0.988564138	S1
										S2
Falha DP + MCP	INTERROMPER	1.24905E-06	2.24828E-05	0.609963395	0.602617749	0.062137594	0.000113663	0.60235982	0.502492886	<b>S1</b>
	DECISAO	INTERROMPER	S2							

ESTADO	IProaC1	IProaC2	IPopaC1	IPopaC2	IIProaC1	IIProaC2	IIPopaC1	IIPopaC2	CONSEQUÊNCIA	FUNCAO UTILIDADE	х
<b>S1</b>	0.999629	0.999868	0.999964	0.790049	0.999988	0.997427	0.999908	0.704736	Offloading com sucesso	0	0
S2	0.000371	0.000132	0.000036	0.209951	0.000012	0.002573	0.000092	0.295263	Interromper a operação até as condições melhorem	0.817574476	0.5
S1	0.999629	0.999868	0.999964	0.790049	0.999988	0.997427	0.999908	0.704736	Perde a possibilidade de ter o offloading com sucesso	1	1
S2	0.000371	0.000132	0.000036	0.209951	0.000012	0.002573	0.000092	0.295263	Decisão Correta (Condições desfavoráveis)	0	0
S1	0.999953	0.999928	0.288579	0.434133	0.999467	0.999881	0.552207	0.611871	Offloading pode ser finalizado com precauções	0.272761789	0.1
S2	0.000047	0.000082	0.711421	0.565867	0.000533	0.000119	0.447793	0.388129	Desconexão de emergência. Abortar a operação	1	1
S1	0.999953	0.999928	0.288579	0.434133	0.999467	0.999881	0.552207	0.611871	Perde a possibilidade de finalizar o offloading	0.941474006	0.75
S2	0.000047	0.000082	0.711421	0.565867	0.000533	0.000119	0.447793	0.388129	Decisão Correta (Evitou-se desconexão de emergência)	0	0
						0.000==0		0.000==0			
S1	0.999998	0.999964	0.023313	0.035076	0.900504	0.999817	0.035489	0.195398	Possibilidade de colisão com impacto médio	0.941474006	0.75
S2	0.000002	0.000036	0.976686	0.964924	0.099496	0.000182	0.964511	0.804602	Possibilidade de colisão com impacto alto	1	1
S1	0.999998	0.999964	0.023313	0.035076	0.900504	0.999817	0.035489	0.195398	Decisão Correta (Não haverá perda)	0	0
S2	0.000002	0.000036	0.976686	0.964924	0.099496	0.000182	0.964511	0.804602	Possibilidade de colisão com impacto baixo	0.624523536	0.3

# F.2. ÁRVORE DE DECISÃO SOBRE INTERROMPER OU CONTINUAR COM A OPERAÇÃO DE OFFLOADING QUANDO UMA SEQUÊNCIA ACIDENTAL OCORRE DADA UMA MUDANÇA DE ESTADO



								IIPopaC2	Estado	IProaC1	IProaC2	IPopaC1	IPopaC2	IIProaC1	IIProaC2	IIPopaC1	IIPopaC2	
DECISAO		CONTINUAR		INTERROMPER					P(S1)	0.999629	0.999868	0.999964	0.790049	0.999988	0.997427	0.999908	0.704736	Nó 1c
CONTINUAR	0.7320093	0.731981	0.7319701	0.7568158	0.7319668	0.7322698	0.731977	0.766904	P(S2)	0.000371	0.000132	0.000036	0.209951	0.000012	0.002573	0.000092	0.295263	2c
INTERROMPER	0 9090546	0 0007503	0 8083500	0.7100205	0 9092772	0.9050754	0 9092754	0 6222521	P(S1)	0.999629	0.999868	0.999964	0.790049	0.999988	0.997427	0.999908	0.704736	11
IIVIERROIVIPER	0.8980346	0.6962093	0.6963699	0.7100305	0.6963773	0.8900764	0.6963254	0.0332321	P(S2)	0.000371	0.000132	0.000036	0.209951	0.000012	0.002573	0.000092	0.295263	21

Nó	IProaC1	IProaC2	IPopaC1	IPopaC2	IIProaC1	IIProaC2	IIPopaC1	IIPopaC2	Estado Natureza
<b>1</b> c	0.73196536	0.73196536	0.73196536	0.73196536	0.73196536	0.73196536	0.73196536	0.73196536	P(Sem Falha)  P(Falha DP)  P(Falha DP+MCP)
<b>2</b> c	0.85028496	0.85028481	0.86464232	0.85032833	0.85143039	0.85028388	0.85855959	0.85029848	P(Sem Falha S12)  P(Falha DP S12)  P(Falha DP+MCP S12)
11	0.89838788	0.89838788	0.89838788	0.89838788	0.89838788	0.89838788	0.89838788	0.89838788	P(Sem Falha)  P(Falha DP)  P(Falha DP+MCP)
21	5.0999E-05	4.386E-05	0.39949039	0.00123885	0.01732659	1.8958E-05	0.21889441	0.00042621	P(Sem Falha S12)  P(Falha DP S12)  P(Falha DP+MCP S12)

Estado Natureza	IProaC1	IProaC2	IPopaC1	IPopaC2	IIProaC1	IIProaC2	IIPopaC1	IIPopaC2	CONSEQUÊNCIAS	FUNCAO UTILIDADE	х
P(Sem Falha)	0.9949204	0.9949204	0.9949204	0.9949204	0.9949204	0.9949204	0.9949204	0.9949204	Offloading comsucesso	0.55527917	0.25
P(Falha DP)	0.0003581	0.0003581	0.0003581	0.0003581	0.0003581	0.0003581	0.0003581	0.0003581	Offloading pode ser finalizado com precauções	0.62452354	0.30
P(Falha DP+MCP)	1.691E-06	Possibilidade de colisão com impacto médio	0.95692451	0.80							
P(Sem Falha S12)	0.9999376	0.9999465	0.5122513	0.9984883	0.979611	0.9999769	0.7333422	0.9994796	Interromper a operação até as condições melhorem	0.8502832	0.55
P(Falha DP S12)	6.236E-05	5.268E-05	0.4825852	0.0014905	0.0156739	2.292E-05	0.2603297	0.0005153	Desconexão de emergência. Abortar a operação	0.87843586	0.63
P(Falha DP+MCP S12)	1.157E-08	8.269E-07	0.0051635	2.121E-05	0.0047151	2.282E-07	0.0063281	5.174E-06	Possibilidade de colisão com impacto alto	1	1
P(Sem Falha)	0.9949204	0.9949204	0.9949204	0.9949204	0.9949204	0.9949204	0.9949204	0.9949204	Perde a possibilidade de ter o offloading comsucesso	0.902667076	0.65
P(Falha DP)	0.0003581	0.0003581	0.0003581	0.0003581	0.0003581	0.0003581	0.0003581	0.0003581	Perde a possibilidade de finalizar o offloading	0.850283199	0.58
P(Falha DP+MCP)	1.691E-06	Possibilidade de colisão com impacto baixo	0.878435858	0.60							
P(Sem Falha S12)	0.9999376	0.9999465	0.5122513	0.9984883	0.979611	0.9999769	0.7333422	0.9994796	Decisão Correta (Condições desfavoráveis)	0	0
P(Falha DP S12)	6.236E-05	5.268E-05	0.4825852	0.0014905	0.0156739			0.0005153	Evitou-se desconexão de emergência	0.817574476	0.52
P(Falha DP+MCP S12)	1.157E-08	8.269E-07	0.0051635				0.0063281		Possibilidade de colisão com impacto médio	0.956924513	0.80

## ANEXO A CARACTERÍSTICAS DO NAVIO ALIVIADOR SUEZMAX DP E DA PLATAFORMA FPSO USADOS NA SIMULAÇÃO

Na simulação foi considerado um FPSO do tipo VLCC com amarração *Spread Mooring* (SMS), com carregamento total (100%) ou em condição lastrado, e um navio aliviador (Max 175.000 TPB), Stavanger, classe SuezMax com Sistema DP1 (Enhanced). As características principais são dadas na Tabela A1

Tabela A.1 Características principais do FPSO e Navio Aliviador

Propriedade	FF	PSO	Navio Aliviador		
Портичаче	Condição carregada	Condição carregada	Condição Lastro	Condição Lastro	
Comprimento Total LOA (m)	33	7,3	269		
Comprimento entre perpendiculares LBP (m)	32	0,0	258		
Boca (m)	54	4,5	46		
Pontal (m)	27,0		24	1,4	
Calado (m)	27,0	17,5	17,5	9,0	
Deslocamento (ton.)	310720 175170		175170	127510	

O navio aliviador utilizado é dotado de 4 propulsores e um leme, conforme a Tabela A.2.

Tabela A.2 - Dados dos Propulsores e Leme do Aliviador Suezmax

Propulsor	Posição em relação à Meia Nau	Empuxo máximo	Potência
1- Tunnel Thruster Bow	x=123m y=0m	+/-31tonf	2200kW
2- Azimuth Stern Thruster	x=-119m y=0m	+38tonf; -24tonf	2200kW
3- Azimuth Bow Thruster	x=119m y=0m	+38tonf; -24tonf	2200kW
4- Main Propeller	x=-129m y=0m	+211tonf; -135tonf	18.881kW