ARTHUR HENRIQUE DE ANDRADE MELANI

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA DIAGNOSE DE
FALHAS NA OPERAÇÃO DE NAVIOS TRANSPORTADORES DE GÁS
NATURAL LIQUEFEITO ATRAVÉS DE REDES BAYESIANAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo como requisito para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia
Mecânica

São Paulo

2015

ARTHUR HENRIQUE DE ANDRADE MELANI

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA DIAGNOSE DE
FALHAS NA OPERAÇÃO DE NAVIOS TRANSPORTADORES DE GÁS
NATURAL LIQUEFEITO ATRAVÉS DE REDES BAYESIANAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo como requisito para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Professor Dr.
Gilberto Francisco Martha de Souza

São Paulo

2015

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

São Paulo, 15 de setembro de 2015.

Assinatura do autor: Arthur Henrique de Andrade Melani

Assinatura do orientador: Gilberto Francisco Martha de Souza

Catálogo-na-publicação

Melani, Arthur Henrique de Andrade

Desenvolvimento de um método para diagnose de falhas na operação de navios transportadores de gás natural liquefeito através de redes bayesianas / A. H. A. Melani -- São Paulo, 2015.

180 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.inteligência artificial (diagnóstico) 2.gás natural 3.transporte marítimo 4.navio tanque I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, em especial meus pais, Teresa Cristina e Marcos, e minha irmã, Amanda, pelo incentivo e amor incondicionais.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Teresa Cristina e Marcos, agradeço pelo amor, apoio, carinho e paciência que me dedicam;

À minha irmã, Amanda, pelo companheirismo, carinho e ajuda essenciais para a realização deste trabalho.

Ao Profº Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza, pela orientação deste trabalho, pela oportunidade e pela confiança demonstrada;

Aos meus colegas do laboratório, agradeço pela amizade e ajuda no desenvolvimento deste trabalho;

Aos meus amigos, pelo apoio e compreensão durante a evolução deste projeto;

À CNPq, pelo apoio financeiro concedido para a realização deste trabalho.

RESUMO

O Gás Natural Liquefeito (GNL) tem, aos poucos, se tornado uma importante opção para a diversificação da matriz energética brasileira. Os navios metaneiros são os responsáveis pelo transporte do GNL desde as plantas de liquefação até as de regaseificação.

Dada a importância, bem como a periculosidade, das operações de transporte e de carga e descarga de navios metaneiros, torna-se necessário não só um bom plano de manutenção como também um sistema de detecção de falhas que podem ocorrer durante estes processos.

Este trabalho apresenta um método de diagnose de falhas para a operação de carga e descarga de navios transportadores de GNL através da utilização de Redes Bayesianas em conjunto com técnicas de análise de confiabilidade, como a Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA) e a Análise de Árvores de Falhas (FTA).

O método proposto indica, através da leitura de sensores presentes no sistema de carga e descarga, quais os componentes que mais provavelmente estão em falha. O método fornece uma abordagem bem estruturada para a construção das Redes Bayesianas utilizadas na diagnose de falhas do sistema.

ABSTRACT

Liquefied Natural Gas (LNG) has gradually become an important option for the diversification of the Brazilian energy matrix. LNG carriers are responsible for LNG transportation from the liquefaction plant to the regaseification plant.

Given the importance, as well as the risk, of transportation and loading/unloading operations of LNG carriers, not only a good maintenance plan is needed, but also a failure detection system that localizes the origin of a failure that may occur during these processes.

This research presents a fault diagnosis method for the loading and unloading operations of LNG carriers through the use of Bayesian networks together with reliability analysis techniques, such as Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA).

The proposed method indicates, by reading sensors present in the loading and unloading system, which components are most likely faulty. The method provides a well-structured approach for the development of Bayesian networks used in the diagnosis of system failures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte (Ano base: 2013).....	2
Figura 2 – Experience na Baía de Guanabara, RJ.	3
Figura 3 - Cadeia de valor do gás natural.....	8
Figura 4 - Custos das etapas da cadeia de valor do gás natural.....	9
Figura 5 - Navios Metaneiros	10
Figura 6 - Navio Prismático	12
Figura 7 - Tanque do Navio Prismático	12
Figura 8 - Navio do tipo Esférico ou Moss	13
Figura 9 - Tanque do Navio Esférico	13
Figura 10 - Navio do tipo GTT MARK III	14
Figura 11 - Tanque do Navio GTT MARK III.....	14
Figura 12 - Navio do tipo GTT N°96	15
Figura 13 - Tanque do Navio GTT N° 96.....	15
Figura 14 - Conexão do Navio com o Porto através de Braços Criogênicos	18
Figura 15 - Processo de carga de GNL.....	20
Figura 16 - Processo de descarga de GNL	21
Figura 17 - Sistema de Carga/Descarga Típico de um Navio do Tipo Membrana	22
Figura 18 - Função de Probabilidade Acumulada $F(t)$	25
Figura 19 - Função de Confiabilidade $R(t)$	26
Figura 20 - Representação da Curva da Banheira	27
Figura 21 - Exemplo de Rede Bayesiana	46
Figura 22 - Exemplo de Rede Bayesiana com as CPTs de cada nó	47
Figura 23 - Exemplo de Condição de Markov	49
Figura 24 - Exemplo de Cobertor de Markov	50
Figura 25 - Exemplos de D-Separação.....	51
Figura 26 - Inferência	52
Figura 27 - Conversão da Árvore de Falhas em Rede Bayesiana	54
Figura 28 - Conversão de um conector lógico "E"	55

Figura 29 - Conversão de um Conector Lógico "OU"	55
Figura 30 - Etapas do Método Proposto	58
Figura 31 - Arranjo Geral de uma Árvore Funcional	60
Figura 32 - Exemplo de FT a ser desenvolvida	62
Figura 33 - Uso da Rede Bayesiana na Diagnose de Falhas	64
Figura 34 - Sistema de Carga e Descarga do Navio	66
Figura 35 - Árvore Funcional do Sistema de Carga e Descarga	70
Figura 36 - FT "Nível de GNL Acima do Esperado" para o sensor LI1, durante a descarga do tanque	77
Figura 37 - RB "Nível de GNL Acima do Esperado" para o sensor LI1, durante a descarga do tanque	79
Figura 38 - RB para o sistema de Boil-off	80
Figura 39 - RB do sistema de GNL para a descarga dos tanques	81
Figura 40 - RB do sistema de GNL para o carregamento dos tanques	82
Figura 41 - RB do sistema de Boil-off: Probabilidades a priori	88
Figura 42 - RB do sistema de Boil-off: Nenhuma leitura inesperada	89
Figura 43 - RB do sistema de Boil-off: DG1 com leitura inesperada	90
Figura 44 - RB do sistema de Boil-off: DG1 e PG1 com leituras inesperadas	91
Figura 45 - RB do sistema de Boil-off: DG1, DG2, DG3, DG4, PG1, PG2, PG3 e PG4 com leituras inesperadas	92
Figura 46 - RB do sistema de GNL (Carga): Probabilidades a priori	94
Figura 47 - RB do sistema de GNL (Carga): Nenhuma leitura inesperada	95
Figura 48 - RB do sistema de GNL (Carga): LI1 e PL1 com leituras inesperadas	96
Figura 49 - RB do sistema de GNL (Descarga): Probabilidades a priori	99
Figura 50 - RB do sistema de GNL (Descarga): Nenhuma leitura inesperada ..	100
Figura 51 - RB do sistema de GNL (Descarga): LI1 e PL1 com leituras inesperadas	101
Figura 52 - RB do sistema de GNL (Descarga): Inserindo evidência sobre componente	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela para a elaboração do FMEA (Carazas, 2006)	33
Tabela 2 - Classificação da Severidade Conforme Norma ISO 9000 (Souza, 2008)	34
Tabela 3 - Símbolos dos eventos da FTA (O'Connor, 2012; Kececioglu, 1991).....	37
Tabela 4 - Conectores Lógicos da FTA (O'Connor, 2012; Kececioglu, 1991)....	38
Tabela 5 - Exemplo de CPT (Jensen e Nielsen, 2007)	44
Tabela 6 - Exemplo de tabela de probabilidades conjuntas (Jensen e Nielsen, 2007)	45
Tabela 7 - Formulário empregado na análise FMEA (adaptado de Hidalgo, 2010)	61
Tabela 8 - Legenda de Equipamentos da Figura 34	67
Tabela 9 - FMEA dos tanques de armazenamento	72
Tabela 10 - Taxa de falha para os componentes em estudo	84
Tabela 11 - Exemplo de CPT de um sensor após a conversão de FT para RB	85
Tabela 12 - Exemplo de CPT de um sensor após a inserção de sua confiabilidade	85

LISTA DE SIGLAS

AF – Árvore Funcional

CPT – Tabela de Probabilidades Condicionais

DAG – Grafo Acíclico Direcionado

FMEA – Análise de Modos e Efeitos de Falha

FSRU – Unidades Flutuantes de Armazenagem e Regaseificação

FT – Árvore de Falhas

FTA – Análise de Árvore de Falhas

GNL – Gás Natural Líquido

RB – Rede Bayesiana

RBOO – Rede Bayesiana Orientada a Objetos

RTP – Transição Rápida de Fase

SDF – Sistema de Diagnose de Falhas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações Iniciais	1
1.2	Objetivos	4
1.3	Estrutura da Dissertação	5
2	SISTEMA DE CARGA E DESCARGA DO NAVIO METANEIRO	6
2.1.	O GNL e sua cadeia de valor	6
2.2.	O navio metaneiro	10
2.3.	Procedimentos de carga e descarga de um navio metaneiro	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1.	Considerações Iniciais - Falha e Confiabilidade	23
3.2	Diagnose de Falha - Definição e Características	29
3.3.	Métodos Utilizados na Diagnose de Falhas	31
3.3.1	Análise de Modos e Efeitos de Falha	31
3.3.2	Análise de Árvore de Falhas	36
3.3.2.1.	Árvore de Falhas Não Coerentes	39
3.3.3.	Redes Bayesianas	40
3.3.3.1.	Probabilidade sob a ótica bayesiana	41
3.3.3.2.	Probabilidade Condicional	42
3.3.3.3.	Tabela de Probabilidades Condicionais e Probabilidade Conjunta	44
3.3.3.4.	Definição de Rede Bayesiana	45
3.3.3.5.	Independência entre nós na Rede Bayesiana	48
3.3.3.6.	Inferência na Rede Bayesiana	51
3.3.3.7.	Rede Bayesiana na Diagnose de Falhas	53
3.3.3.8.	Conversão de Árvores de Falhas em Redes Bayesianas	54

4	METODOLOGIA	57
4.1.	O método proposto	57
4.2.	Árvore Funcional e Descrição Funcional	59
4.3.	FMEA	60
4.4.	Árvore de Falhas	61
4.5.	Redes Bayesianas	62
5	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NO SISTEMA DE CARGA E DESCARGA DO NAVIO METANEIRO	65
5.1.	Descrição do Sistema	65
5.2.	Árvore Funcional e Descrição Funcional	69
5.3.	Análise de Modos e Efeitos de Falha	71
5.4.	Árvores de Falha	73
5.5.	Redes Bayesianas	78
5.5.1.	Conversão de FTs em RBs	78
5.5.2.	Inserindo as Probabilidades a Priori	83
5.5.3.	Inserindo a Incerteza do Sensor	85
5.6.	Validação do Método	86
5.6.1.	Análise da RB do sistema de <i>Boil-off</i>	86
5.6.2.	Análise da RB do Sistema de GNL (Carga)	93
5.6.3.	Análise da RB do Sistema de GNL (Descarga)	97
6	CONCLUSÕES	103
6.1.	Conclusões Parciais	103
6.2.	Sugestões para Trabalhos Futuros	104
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	APÊNDICE A - DESCRIÇÃO FUNCIONAL	112
	APÊNDICE B - ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHA	120
	APÊNDICE C - ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS	142

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A busca por alternativas ao uso do petróleo e por fontes de energia menos agressivas ao meio ambiente fez com que, principalmente a partir dos anos 80, o consumo mundial de gás natural entrasse em franca expansão (ANEEL, 2008).

No Brasil, a expansão do mercado de gás natural se iniciou através da exploração da Bacia de Campos, no Rio de Janeiro, no início da década de 1980 (Manoel, 2006). Além da pequena produção nacional, o gás natural passou a ser importado da Bolívia, com o início das operações do Gasoduto Bolívia-Brasil, em 1999. A diversificação das fontes de suprimento deste combustível fóssil tornou-se necessária devido às incertezas quanto ao fornecimento de gás pelo país vizinho. Neste ambiente, o Brasil se viu na necessidade de encontrar alternativas à importação do gás boliviano, visando atender à demanda nacional crescente.

O Gás Natural Liquefeito (GNL) surge, então, como principal alternativa. Este combustível pode ser transportado por navios de grande porte, os navios metaneiros, dos países exportadores, onde o gás natural é liquefeito, aos países importadores, onde o gás é regaseificado (Silva, 2013).

Duas unidades de regaseificação foram, então, construídas em Pecém, Ceará, e na Baía de Guanabara, Rio de Janeiro. Estas unidades, que entraram em operação em 2009, tornaram possível a importação de gás de países como Nigéria e Trinidad e Tobago.

O gás natural tem, rapidamente, se tornado uma importante fonte de energia na matriz energética brasileira. De acordo com EPE, 2014, o gás natural foi responsável pela geração de 11,6% dos 570 TWh de energia elétrica

produzida no Brasil em 2013, como pode ser observado na Figura 1. Em 2009, o gás era responsável por apenas 2,6% da geração de energia elétrica.

Figura 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte (Ano base: 2013)

Fonte: EPE (2014)

Devido ao crescente consumo de gás natural no país nos últimos anos, altos investimentos foram feitos a fim de aumentar a capacidade de importação de GNL. Dentre estes investimentos, estão a construção de mais um terminal de regaseificação (na Baía de Todos os Santos, Bahia, que entrou em operação em 2013), além do afretamento do maior navio regaseificador do mundo, o Experience (Figura 2), que se junta aos outros dois navios metaneiros operantes no Brasil, o Golar Spirit e o Golar Winter.

Para transportar o GNL é necessário resfriá-lo em uma planta de liquefação até temperaturas abaixo de sua temperatura de vaporização, $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que reduz o volume em até 600 vezes. Posteriormente, o gás natural já liquefeito é bombeado e armazenado em tanques que devem manter essa temperatura durante o transporte. Isso faz com que um bom sistema de isolamento térmico seja necessário, a fim de evitar a regasificação do GNL no interior dos tanques do navio.

Dada a importância, bem como a periculosidade, das operações de carga e descarga de navios metaneiros, torna-se necessário não só um bom plano de manutenção dos equipamentos envolvidos nestas operações como também um sistema de diagnose das falhas que podem ocorrer durante estes processos, possibilitando a rápido isolamento de uma falha e/ou eventual paralisação dos mesmos.

Figura 2 – Experience na Baía de Guanabara, RJ.

Fonte: Petrobrás (2014)

Um sistema de diagnose de falhas consegue, através de técnicas de modelagem, prever ou ao menos indicar as causas de determinada falha (Lampis, 2010). A diagnose baseada em Redes Bayesianas é capaz de realizar esta tarefa através da inserção de evidências sobre as condições atualizadas de funcionamento em que o equipamento, processo ou sistema em estudo se encontra. Assim sendo, elas têm sido cada vez mais aplicadas em problemas de diagnose.

Para o desenvolvimento de um bom programa de diagnose de falhas, é necessário um vasto conhecimento sobre o objeto de estudo. Técnicas de análise de confiabilidade como Árvore Funcional, Análise de Modos e Efeitos de Falhas

e Árvore de Falhas são importantes ferramentas para a completa compreensão do funcionamento de determinado sistema, bem como o amplo entendimento de causas e consequências de possíveis falhas que estes apresentem. Tais técnicas podem contribuir para a aplicação de Redes Bayesianas no processo de diagnose de falhas em sistemas.

O desenvolvimento de uma metodologia de diagnose de falhas usando as técnicas de confiabilidade e de Redes Bayesianas para o caso de navios metaneiros contribui para uma maior segurança no transporte de GNL. Adicionalmente, o método de diagnose de falhas permitirá à equipe de operação do navio mitigar mais rapidamente uma falha, reduzindo o tempo de indisponibilidade do sistema quando da operação de carga/descarga.

1.2 Objetivos

O objetivo desta pesquisa é desenvolver uma metodologia para diagnose de falhas na operação de navios transportadores de GNL através da utilização de Redes Bayesianas em conjunto com outras técnicas como a Análise de Modos e Efeitos de Falha e a Árvore de Falhas.

A metodologia deve fornecer um procedimento estruturado para a construção da Rede Bayesiana. A Rede Bayesiana obtida deve, por sua vez, apresentar os componentes que mais provavelmente são os responsáveis por uma determinada falha do sistema de carga e descarga do navio metaneiro em estudo. A falha em questão será observada através da leitura de sensores presentes no sistema.

Para a validação da metodologia, todas as possíveis combinações de leitura dos sensores serão introduzidas na Rede Bayesiana e os resultados que esta produzir serão analisados.

Pretende-se, ainda, explorar as vantagens e desvantagens da aplicação desta metodologia em relação aos tradicionais métodos de diagnose de falhas,

que utilizam apenas a Árvore de Falhas, visando a minimização dos efeitos de uma falha no funcionamento do navio metaneiro.

1.3 Estrutura da Dissertação

A fim de atingir os objetivos anteriormente descritos, esta dissertação está estruturada em sete capítulos. O capítulo 1 apresenta uma breve introdução sobre o assunto, bem como os objetivos da pesquisa e a estrutura do texto.

No capítulo subsequente é apresentada uma descrição do navio metaneiro usado como objeto de estudo, em especial seu sistema de carga e descarga de GNL.

Já no terceiro capítulo são apresentados os conceitos teóricos relevantes ao presente trabalho. Assim, explanações sobre análise de confiabilidade, diagnose de falhas e Redes Bayesianas são realizadas.

O capítulo 4 apresenta a metodologia proposta para a diagnose de falhas na operação de navios transportadores de gás natural liquefeito através de Redes Bayesianas.

No quinto capítulo, a metodologia apresentada no capítulo anterior é aplicada em um navio metaneiro, como estudo de caso.

O capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas através da análise dos resultados da aplicação da metodologia proposta, vistos no capítulo anterior.

Por fim, o capítulo 7 contém as referências utilizadas para a realização deste estudo.

2 SISTEMA DE CARGA E DESCARGA DO NAVIO METANEIRO

Este capítulo é dedicado à descrição do sistema em estudo, bem como o contexto ao qual está inserido. Inicialmente, são apresentadas características do gás natural líquido e sua cadeia de valor. A seguir, os diferentes tipos de navios utilizados para seu transporte são caracterizados e os requisitos de segurança que esses precisam obedecer serão listados. Por fim, uma descrição do funcionamento do sistema de carga e descarga do navio é apresentada.

2.1. O GNL e sua cadeia de valor

Quando resfriado a $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$, sob pressão atmosférica, o gás natural torna-se líquido, ocupando um volume 600 vezes menor em relação àquele ocupado no estado gasoso, o que facilita seu armazenamento e transporte. Pode-se, então, caracterizar o gás natural líquido (GNL), segundo Silva (2013), como um fluido criogênico, tendo em vista que seu ponto de ebulição encontra-se abaixo de $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$.

O GNL, segundo Sandia (2004), é composto predominantemente por metano (entre 85-95%, aproximadamente), além de pequenas quantidades de outras substâncias, tais quais etano, propano, butano, pentano e nitrogênio. Vale ressaltar que a composição do gás natural varia de acordo com a jazida de onde foi extraído e com o processo de liquefação (Speight, 2002).

Devido à baixa temperatura na qual é armazenado, o GNL acaba recebendo calor do meio externo, mesmo se utilizado um bom sistema de isolamento térmico. Tal entrada de calor provoca uma pequena taxa de vaporização do GNL e esses vapores são chamados de *Boil-off*.

Ademais, a densidade do GNL encontra-se na faixa de 400 a 500 kg/m³, ou seja, corresponde a aproximadamente metade da densidade da água (1000 kg/m³). Logo, em caso de vazamento de GNL na água, o mesmo permanece sobre a água até a total vaporização (Silva, 2013).

Outra característica a ser destacada, consiste no fato de que o GNL não é inflamável. Para que se torne inflamável, é necessário que haja a vaporização do GNL, associada a uma fonte de ignição, desde que haja concentração do gás dentro dos limites de inflamabilidade. O limite de inflamabilidade inferior do GNL é de 5%, enquanto o superior é de 15%. Isso significa que se a mistura gás-ar não tiver de 5 a 15 % em volume de gás, não ocorrerá a queima da mistura formada, mesmo que exista uma fonte de ignição. (Petrobrás, 2005).

O transporte e manipulação de GNL através de navios metaneiros devem ser feitos de maneira cuidadosa e criteriosa, já que seu derramamento pode causar graves consequências, como lista Sandia (2004):

- 1) Asfixia: Se o GNL é derramado e começa a evaporar, sua concentração no ar pode se tornar alta o suficiente para criar um risco de asfixia para a tripulação do navio;
- 2) Queimadura Criogênica e Dano Estrutural: O GNL em contato com a pele pode causar graves queimaduras. Além disso, o contato deste fluido com materiais metálicos utilizados nos equipamentos pode torná-los frágeis;
- 3) Incêndio e Explosão: Com o vazamento e consequente evaporação de GNL, um incêndio pode ser iniciado se houver uma fonte de ignição e se a mistura gás-ar estiver dentro do limite de inflamabilidade. Se isso ocorrer em um espaço confinado, um aumento súbito na pressão pode causar uma explosão;
- 4) Transição Rápida de Fase (RPT, do inglês "Rapid Phase Transitions"): Ocorre quando um líquido a baixa temperatura (no caso, o GNL) entra em contato com outro em uma temperatura mais alta (água do mar, por exemplo), resultando em uma evaporação do GNL tão rápida que gera ondas de choque semelhantes a explosões.

A cadeia de valor do gás natural é composta por um conjunto de etapas que envolvem variadas atividades, desde a exploração e produção até a utilização pelo consumidor final, como representado na Figura 3.

Figura 3 - Cadeia de valor do gás natural

Fonte: ANP (2010)

Segundo Naturalgas (2014), a etapa de exploração e produção consiste na pesquisa e prospecção de reservas de gás natural, através de empresas ou grandes grupos, com altos riscos e custos associados. É necessário identificar uma zona que seja uma potencial fonte de hidrocarbonetos, além de obter autorizações e avaliações de riscos ambientais, para então traçar estratégias para melhor exploração da reserva em questão. Na etapa de processamento, o gás é encaminhado a unidades que permitem a extração de impurezas, como sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono, além da remoção do vapor de água, por meio do resfriamento para permitir a condensação da mesma. Em seguida, ocorre o processo de liquefação, por meio de resfriamento, permitindo que o GNL seja transportado por navios, até o terminal de regaseificação, onde ocorrerá a vaporização do GNL. Depois desse processo, o gás natural está pronto para ser transportado, através de gasodutos, chegando aos consumidores finais.

Vale destacar que a regaseificação do GNL pode ocorrer diretamente em plantas de regaseificação ou então o GNL pode ser armazenado para que este processo seja realizado posteriormente, em períodos de maior demanda. Além disso, podem existir plantas de regaseificação a bordo do próprio navio transportador, chamadas de FSRU (Unidades Flutuantes de Armazenagem e Regaseificação, do inglês “Floating Storage and Regasification Unit”).

A Figura 4 apresenta os custos relativos dos quatro principais componentes da cadeia de valor do GNL: exploração e produção, liquefação, transporte e armazenagem e regaseificação. O processo de liquefação é a etapa mais custosa, que representa entre 30-45% do custo total. A etapa de exploração e produção representa de 15-20% do custo total, enquanto que a etapa de transporte corresponde de 10-30% do custo total. Por fim, a etapa de armazenagem e regaseificação representa entre 15-25% do custo total. Também são apresentados na figura alguns exemplos de custos de cada etapa da cadeia de valor, referentes a construções ou operações nos Estados Unidos (DOE, 2005).

Figura 4 - Custos das etapas da cadeia de valor do gás natural

	Exploração e Produção	Liquefação	Transporte	Armazenagem e Regaseificação
	Produção do gás, pré-processamento e transporte	Planta de Liquefação, incluindo armazenagem e plataforma para carregamento do navio metaneiro	Transporte por navio metaneiro	Planta de Regaseificação, incluindo armazenagem e plataforma para descarregamento do navio
% em relação ao custo total	15 a 20	30 a 45	10 a 30	15 a 20
Exemplos de custos	Varia muito	US\$ 1,5 a US\$ 2 bilhões por uma planta que produz 8,2 milhões de toneladas de GNL por ano	US\$ 155 milhões pela compra de um navio de 138 m ³ , ou US\$ 60 mil por dia pelo fretamento	US\$ 400 milhões por um terminal capaz de entregar entre 180 e 360 bilhões de pés cúbicos de gás por ano

Fonte: adaptado de DOE (2005)

A Agência Internacional de Energia estima que os investimentos mundiais nos processos de liquefação, transporte e regaseificação de GNL podem totalizar 252 bilhões de dólares entre 2001 e 2030 (IEA, 2003). Importantes avanços tecnológicos têm reduzido os custos em todos os componentes da cadeia de valor do GNL, durante os últimos 20 anos. Houve uma queda especialmente nos custos de capital para as plantas de liquefação de 600 dólares por tonelada de capacidade no final de 1980, para cerca de 200 dólares por tonelada em 2001 (DOE, 2005).

2.2. O navio metaneiro

A utilização de navios transportadores de GNL constitui uma alternativa economicamente interessante, especialmente nos casos em que a distância entre os centros de produção e consumo é grande. Com a construção de novas plantas de liquefação e regaseificação de GNL, a frota desses navios cresceu consideravelmente nas últimas décadas. A Figura 5 mostra dois exemplos de navios metaneiros (um do tipo esférico, acima, e outro do tipo membrana, abaixo).

Figura 5 - Navios Metaneiros

Fonte: Pitblado e Woodward (2011)

Segundo a IMO (2005), os tanques que armazenam a carga dos navios metaneiros necessitam de duas barreiras, a primária e a secundária, para o transporte seguro do líquido. A barreira primária corresponde à camada interna do sistema de contenção de carga, enquanto que a barreira secundária compreende um elemento externo à barreira primária, projetado para contenção temporária de carga, em caso de vazamento. Ademais, a barreira secundária constitui um requisito obrigatório para o transporte de substâncias em temperatura inferior a -10°C e à pressão atmosférica, pois impede a redução da temperatura da estrutura do navio a um nível perigoso, no caso de vazamentos de carga pela barreira primária. É, portanto, essencial inspecionar periodicamente as barreiras secundárias, uma vez que a estrutura do navio, constituída de aço carbono, não é capaz de suportar as baixas temperaturas de fluidos criogênicos como o GNL.

Segundo Harris (1993), os navios transportadores de GNL podem ser divididos em dois grandes grupos, classificados de acordo com o tipo de apoio do tanque de carga, são eles: tanques independentes ou autoapoiados e tanques integrados. Os tanques independentes incluem navios que possuem tanques de carga do tipo prismático ou esférico, de modo que esse deve resistir a todas as cargas internas e externas associadas ao transporte do fluido, independentemente da estrutura do casco da embarcação. Além disso, esses tanques são fabricados com uma espessura maior de parede e materiais capazes de suportar baixas temperaturas. No que se refere à categoria de tanques integrados, inclui-se tanques conhecidos como tipo membrana e que dependem intimamente da estrutura do navio para manter sua forma geométrica e a integridade estrutural. Esses tanques requerem um sistema de isolamento mais complexo, assim como a instalação completa de uma barreira secundária que proteja todo o tanque de carga. Entrementes, exigem uma menor quantidade de materiais para a construção dos tanques de carga (se comparado com o primeiro grupo), o que leva a uma menor espessura da camada de material utilizada na fabricação de barreiras, reduzindo o tempo de resfriamento do tanque e o peso total de sua estrutura.

Assim sendo, segundo IMO (2005), têm-se quatro tipos de navios transportadores de GNL, de acordo com a forma do tanque de armazenamento e com o material utilizado para sua fabricação, são eles: navios do tipo prismático, navios do tipo Moss ou esféricos, navios do tipo membrana GTT MARK III e navios do tipo membrana GTT N°96.

Os navios do tipo prismático (Figura 6) apresentam um sistema que permite que os tanques de carga sejam posicionados com o uso de apoios e calços que impedem sua movimentação. A barreira secundária deste tanque (Figura 7) é parcial e constituída por bandejas de gotejamento.

Figura 6 - Navio Prismático

Fonte: Harris (1993)

Figura 7 - Tanque do Navio Prismático

Fonte: Lamb (2004) apud Silva (2013)

Os navios do tipo Moss ou esféricos (apresentado na Figura 8) possuem tanques independentes (ilustrados na Figura 9) que suportam integralmente o

peso da carga e são isolados com espuma de resina de fenol e espuma de poliuretano. Todos os espaços em torno dos tanques de carga são preenchidos com gás inerte e um sistema de monitoração para indicar possíveis vazamentos de carga é montado. A barreira secundária é parcial e serve como proteção contra vazamentos, de modo a evitar o contato do líquido criogênico com o casco do navio, através de uma bandeja de coleta de gotejamento na parte inferior do tanque principal de carga.

Figura 8 - Navio do tipo Esférico ou Moss

Fonte: Harris (1993)

Figura 9 - Tanque do Navio Esférico

Fonte: Lamb (2004) apud Silva (2013)

Os navios do tipo membrana GTT MARK III, como mostrado na Figura 10, são fabricados com tecnologia francesa *Technigaz* MARK III, na qual a primeira camada de contato com a carga é fabricada de aço inoxidável. Possuem tanques do tipo integrado (Figura 11), constituídos por uma fina camada (membrana) suportada através do isolamento pela estrutura do casco adjacente. Os painéis de isolamento são constituídos por três camadas fixadas ao casco do navio, com a finalidade de apoiar a primeira camada do tanque. Essas três camadas são constituídas por: 160 mm de espessura de espuma de poliuretano reforçado com fibra de vidro, uma camada triplex que atua como barreira secundária e 80 mm de espessura de placa de poliuretano.

Figura 10 - Navio do tipo GTT MARK III

Fonte: Harris (1993)

Figura 11 - Tanque do Navio GTT MARK III

Fonte: Lamb (2004) apud Silva (2013)

Os navios do tipo membrana GTT N°96 (Figura 12) utilizam *invar* para a fabricação da membrana. O *invar* é um aço inoxidável com alto teor de níquel (36%) e que apresenta um coeficiente de dilatação térmica muito baixo (da ordem de 10% do observado para o aço comum), de modo que quase não sofre contração em contato com fluidos criogênicos. As membranas deste tanque (Figura 13) são idênticas (barreira primária e secundária) e estão dispostas com superfícies planas internas, semelhantes à tecnologia *Technigaz*.

Figura 12 - Navio do tipo GTT N°96

Fonte: Harris (1993)

Figura 13 - Tanque do Navio GTT N° 96

Fonte: Lamb (2004) apud Silva (2013)

Ademais, o Código Internacional para a Construção de Equipamentos de Navios Transportadores de Gases Liquefeitos (IMO, 2005) determina uma série

de requisitos que os navios metaneiros devem cumprir para o transporte seguro de grandes quantidades de gás liquefeito, listadas a seguir:

- 1) Os materiais utilizados no casco do navio, tanque de armazenamento, redes de transporte de carga e soldagem, por exemplo, devem ser selecionados e testados para atender às suas aplicações, incluindo parâmetros de operação como temperatura e carregamento externo.
- 2) O tanque de carga deve ser isolado da maquinaria principal do navio transportador, da área de controle de operação, bem como das áreas utilizadas pela tripulação do navio. Além disso, os sistemas de tubulação de carga devem ser isolados dos demais sistemas. Por fim, a circulação de ar das áreas tripuladas deve ser completamente separada da área de carga.
- 3) Os sistemas de tubulação de carga devem ser capazes de se expandir e contrair sob mudanças de temperatura e sob ação dos movimentos dos tanques de carga. Quando necessário, essas tubulações devem incluir articulações de expansão mecânica, isolamento térmico e válvulas de alívio.
- 4) Cada tanque de carga é equipado com duas válvulas de alívio de pressão de igual capacidade. Essas são conectadas com o sistema de ventilação, que possui grandes mastros, com saídas localizadas o mais alto possível, acima do convés principal.
- 5) A base de cada tanque de carga é equipada com uma bomba de descarga de GNL submersa. O fornecimento de energia para essas bombas é feito através de cabos de aço inoxidável revestido. Ademais, essas bombas são resfriadas e lubrificadas pelo próprio GNL.
- 6) Os sistemas de desligamento de emergência nos navios metaneiros devem operar automaticamente em caso de queda de energia ou incêndio.
- 7) O cabeamento elétrico deve utilizar material certificado para operar em áreas com presença de gás, a fim de minimizar o risco de incêndio ou explosão.

- 8) Os tanques de carga de GNL devem ser devidamente instrumentados, com o objetivo de monitorar todos os aspectos relacionados aos sistemas de manipulação de carga, como indicadores de nível, sensores de pressão e termômetros. Um sistema de detecção de gás, com alarmes audíveis e visuais, deve ser fixado em todos os locais onde pode ocorrer acúmulo de gás. Além disso, deve ser capaz de coletar amostras continuamente em intervalos que não excedam 30 minutos. Por fim, equipamentos de detecção de gás portáteis também devem ser carregados a bordo.
- 9) Os vapores de Boil-off dos navios metaneiros podem ser utilizados como combustível nas maquinarias principais. Essas tubulações de gás combustível devem ser cuidadosamente localizadas (de modo a não atravessar áreas tripuladas), controladas, ventiladas e monitoradas.
- 10) Quatro diferentes sistemas de proteção e extinção de fogo estão disponíveis em navios transportadores de GNL. O sistema principal de extinção de incêndio deve ser instalado de modo a atingir toda a área de carga. Além disso, áreas com presença de gás devem conter sistemas fixos de extinção de incêndio.
- 11) Os membros da tripulação engajados nas operações de carga devem portar equipamentos de proteção individual adequados.

2.3. Procedimentos de carga e descarga de um navio metaneiro

Os procedimentos que envolvem as operações de carga ou descarga do GNL são essenciais para garantir a segurança e eficiência do processo. Tais procedimentos se iniciam previamente à carga ou descarga em si, com a verificação dos parâmetros de pressão e temperatura, bem como com um teste de funcionalidade dos sistemas de monitoração, alarme, emergência e incêndio, por exemplo.

Na chegada do navio ao terminal de liquefação ou regaseificação faz-se necessário realizar a amarração e atracação, fixando o navio de forma segura ao terminal e consequentemente minimizando movimentações durante as operações. O sistema de tubulações que comunica o terminal aos tanques de carga é composto basicamente por quatro braços criogênicos, dos quais três deles destinam-se ao carregamento ou descarregamento, e um deles ao deslocamento de Boil-off durante esses processos. A Figura 14 mostra esta conexão já estabelecida.

Figura 14 - Conexão do Navio com o Porto através de Braços Criogênicos

Fonte: SAGGAS (2014)

Antes da realização da operação de carga ou descarga, é essencial que se realize o processo de inertização das tubulações. Neste processo, as tubulações são preenchidas com um gás inerte, normalmente nitrogênio, propiciando um ambiente não combustível durante a carga ou descarga do GNL, evitando assim, possíveis incêndios ou explosões.

Em seguida ao processo de inertização, o resfriamento das tubulações e tanques de armazenamento é realizado. Isto deve ocorrer, pois uma carga súbita de GNL em baixíssima temperatura no interior dos tanques e tubulações poderia

estabelecer um elevado gradiente de temperatura. Isso pode levar à gaseificação do GNL no interior do tanque de carga, o que levaria a um aumento de pressão e, consequentemente, a um aumento do risco de explosão. O resfriamento dos tanques, que é feito apenas no processo de carga, é realizado utilizando-se um sistema de spray de GNL que fica dentro de cada um dos tanques de carga, até que a temperatura alcance -130°C . Ademais, a baixa temperatura do GNL no interior dos tanques e tubulações provoca a condensação do vapor de água, presente no ar atmosférico, levando à formação de uma camada de gelo na parte externa destas estruturas.

Após a inertização e resfriamento dos tanques, a operação de carga ou descarga pode ser iniciada. No processo de carga, o GNL é enviado desde o terminal de liquefação até os tanques do navio. Já no processo de descarga, o GNL faz o caminho oposto através da ativação de bombas criogênicas presentes no interior dos tanques do navio.

Vale ressaltar que em torno de 5% da carga total de GNL precisa permanecer em cada tanque de armazenagem, mesmo depois de sua descarga, mantendo a temperatura interna dos tanques durante a viagem do navio descarregado.

Com o fim da operação de carga ou descarga, deve-se realizar a drenagem do sistema utilizado, bem como a inertização dos braços criogênicos, os quais serão posteriormente desconectados. Segue-se então a desamarração e desatracação do navio, finalizando o processo, e permitindo a partida do navio transportador. A Figura 15 apresenta um esquema com todos os procedimentos necessários para o carregamento do navio, enquanto a Figura 16 ilustra o processo de seu descarregamento.

Outro aspecto importante é o fato de que, paralelamente às operações de carga ou descarga, ocorrem os processos de controle de lastro. O navio transportador de GNL possui tanques que servem exclusivamente para conter água de lastro. Durante a operação de carga do GNL, a água de lastro é removida

dos tanques, enquanto que durante a operação de descarga do GNL ocorre a carga da água de lastro dos tanques destinados a esse fim.

Figura 15 - Processo de carga de GNL

Fonte: ICS (1993) apud Silva (2013)

Figura 16 - Processo de descarga de GNL

Fonte: ENAGAS (2006) apud Silva (2013)

A Figura 17 apresenta um típico sistema de carga e descarga de GNL de um navio metaneiro do tipo membrana. Na figura, é possível perceber que, além da tubulação necessária à movimentação de GNL, existem tubulações para o resfriamento do tanque e para a movimentação de Boil-off.

A tubulação para resfriamento do tanque é utilizada previamente ao carregamento do navio e leva GNL até um sistema spray presente dentro de cada tanque, irrigando suas paredes e resfriando-o.

O Boil-off, através de tubulação própria, pode ser utilizado como combustível do navio durante a operação de transporte. Já na operação de carga, o Boil-off deve ser enviado à instalação portuária, de modo a evitar que a pressão no interior dos tanques se eleve. Durante a operação de descarga, existe a possibilidade do Boil-off ter que ser enviado do terminal para os tanques, de modo que a pressão neles não fique muito baixa (menor que a atmosférica).

Figura 17 - Sistema de Carga/Descarga Típico de um Navio do Tipo Membrana

Fonte: Adaptado de ABS (2008)

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta, de maneira estruturada, os conceitos teóricos relevantes a este trabalho. Inicialmente, são explicitadas as definições de falha e confiabilidade. Com base nesses conceitos, introduz-se a caracterização de diagnose de falhas, bem como algumas das técnicas utilizadas para sua implementação.

3.1. Considerações Iniciais - Falha e Confiabilidade

Durante a Segunda Guerra Mundial, segundo Felix (2006), com o desenvolvimento de armas e equipamentos de alta complexidade, houve a necessidade de estabelecer métodos que permitissem estimar a vida útil ou a probabilidade de operação com sucesso de determinado equipamento. Neste contexto, passaram a ser empregados os conceitos de confiabilidade em projetos de engenharia.

Com o fim da guerra e o desenvolvimento da energia nuclear, informa Hidalgo (2010), tornou-se essencial o emprego de conceitos de confiabilidade a fim de reduzir a probabilidade de falhas de sistemas, as quais poderiam resultar, inclusive, em vazamentos de material radioativo. Ademais, estes conceitos foram igualmente utilizados na indústria aeroespacial, a fim de associar falhas ao tempo de operação dos equipamentos.

No contexto atual, o emprego de conceitos de confiabilidade, a fim de reduzir a probabilidade de falha na produção e/ou operação de um produto, tornou-se essencial para a competitividade empresarial, especialmente com a progressiva exigência do mercado por produtos com alto desempenho e menor preço. Além disso, uma falha no desenvolvimento de um produto promove elevação de custos e pode levar ao comprometimento da segurança do consumidor.

Assim sendo, a confiabilidade é a probabilidade de um produto, máquina, sistema ou equipamento executar sua função sem falhas por um período de tempo pré-determinado dentro das especificações para as quais foi projetado. Logo, é possível determinar a partir de que momento o equipamento sob análise apresenta uma confiabilidade abaixo da aceitável e definir, por exemplo, quando este deve ser substituído (Souza, 2008).

O termo falha, de modo geral, é definido como a incapacidade de um equipamento ou sistema desempenhar a função para a qual foi projetado (Smith e Hinchcliffe, 2004).

Definindo uma variável aleatória T como o tempo até ocorrer a falha, pode-se determinar sua correspondente função densidade de probabilidade $f(t)$ para determinado intervalo de tempo como representado na Equação 1:

$$f(t) \cdot \Delta t = P\{t < T < t + \Delta t\} \quad (1)$$

A função densidade de probabilidade, representada como $F(t)$, decorre que:

$$F(t) = P\{T < t\} = \int_0^t f(t) dt \quad (2)$$

Logo, $F(t)$ representa a probabilidade de ocorrer falha até um tempo t . A função $F(t)$ mostrada é crescente com o tempo e atinge um valor unitário quando t tende a infinito, como indicado na Figura 18.

Figura 18 - Função de Probabilidade Acumulada $F(t)$

Fonte: Leitch (1995)

De acordo com Leitch (1995), um componente ou equipamento, sob a perspectiva de sua lógica de operação, ou está operando adequadamente conforme previsto no projeto, ou está no estado de falha, o que demonstra que estes são eventos mutuamente excludentes. Logo, a confiabilidade pode ser expressa, probabilisticamente, pela relação a seguir:

$$R(t) = P\{T > t\} \quad (3)$$

Ou seja,

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (4)$$

Analisando a Figura 18 e a Equação 4, é possível obter a função de confiabilidade, representada na Figura 19.

Figura 19 - Função de Confiabilidade $R(t)$

Fonte: Leitch (1995)

Como decorrência da própria definição da função de distribuição acumulada, tem-se:

$$R(t = 0) = 1 \quad (5)$$

$$R(t = \infty) = 0 \quad (6)$$

Como é possível verificar a partir do gráfico representado na Figura 19, a confiabilidade de um sistema decai ao longo do tempo, logo, quanto maior o tempo de operação maior será a probabilidade de apresentar falha. Pode-se concluir então, que apenas no instante em que o equipamento é colocado em operação sua confiabilidade é de 100%. Ademais, pode-se afirmar que a confiabilidade não é restaurada, ou seja, não aumenta ao longo da vida operacional do equipamento.

A análise da taxa de falha possibilita uma melhor compreensão do comportamento de determinado componente ou sistema com relação à falha. Esta

taxa de falha, $\lambda(t)$, segundo Souza (2008), pode ser definida em termos da própria confiabilidade: “Sendo $\lambda(t).\Delta t$ a probabilidade de que o sistema falhará em um tempo $T < t + \Delta t$, dado que ainda não falhou até o tempo em $T = t$, tem-se que $\lambda(t).\Delta t$ é a probabilidade condicional indicada na Equação 7”:

$$\lambda(t).\Delta t = P(T < t + \Delta t | T > t) \quad (7)$$

Assim, com base na definição de probabilidade condicional, tem-se:

$$P(T < t + \Delta t | T > t) = P\{(T > t) \cap (T < t + \Delta t)\} / P(T > t) \quad (8)$$

Como o numerador da Equação 8 é a própria $f(t).\Delta t$ e o denominador é a $R(t)$, a taxa de falhas instantânea é expressa pela relação:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (9)$$

Segundo Lewis (1987), pode ser usado como indicador das causas de falha o comportamento da taxa de falha $\lambda(t)$ em relação ao tempo t . Sendo assim, a curva da banheira (“bathtub curve”), representada na Figura 20, permite representar graficamente esta relação para sistemas ou componentes sem redundância.

Figura 20 - Representação da Curva da Banheira

Fonte: Lewis, 1987

Na figura 20, o primeiro intervalo apresentado denomina-se de falhas precoces e apresenta taxas de falha que decrescem a partir de $t = 0$. É uma região relativamente curta e que, em analogia com os seres humanos, é chamada de mortalidade infantil. Sob esta perspectiva de comparação, as mortes seriam causadas por defeitos congênitos, sendo que a taxa de mortalidade decresce com o tempo. As falhas precoces estão geralmente associadas com problemas relacionados aos processos de fabricação, montagem ou com o material empregado na fabricação do componente. Vale ressaltar que estes problemas não são usuais, de modo que acontecem esporadicamente, muitas vezes por razões não específicas.

O segundo intervalo representado corresponde ao período de falhas aleatórias, no qual a taxa de falha é menor e aproximadamente constante. As falhas ocorridas nesta fase normalmente são originadas de carregamentos inevitáveis e inesperados e mais raramente a defeitos inerentes ao equipamento. Fazendo-se a analogia com humanos, nesta fase as mortes seriam provocadas por acidentes ou infecções.

Na última região da curva está representada a fase de falhas crescentes, devido ao desgaste do equipamento, na fase final de sua vida útil. As falhas tendem a ocorrer devido ao desgaste por atrito, corrosão, trincas, etc. Esta fase ocorre na maioria dos sistemas mecânicos, de modo que uma elevação rápida da taxa de falha determina a substituição de peças e a vida útil do sistema.

A definição da função densidade de probabilidade dos tempos de falha utiliza as seguintes distribuições de probabilidade: Exponencial, Lognormal e Weibull. Para a caracterização da distribuição exponencial, é utilizado apenas um parâmetro, a taxa de falhas (λ). Para a caracterização da distribuição lognormal são utilizados dois parâmetros, a média ($\mu_{\ln(x)}$) e o desvio padrão ($\sigma_{\ln(x)}$), ambos no domínio logarítmico. Para a caracterização da distribuição de Weibull, são utilizados três parâmetros, a constante de localização (x_0), a constante de escala (η) e a constante de forma (β). A primeira destas distribuições é característica de sistemas eletrônicos, enquanto que a segunda é utilizada em estudos de

resistência mecânica de materiais e a terceira é a mais abrangente destas distribuições, comumente utilizada para modelar problemas de previsão de vida de componentes mecânicos sujeitos a falhas por dano cumulativo, como desgaste ou fadiga (Carazas, 2006).

3.2 Diagnose de Falha - Definição e Características

A diagnose de falhas, de acordo com Papadopoulos (2001), representa o processo de identificação da origem de uma falha através de uma série de efeitos que esta provoca no sistema ao qual pertence.

A crescente complexidade de equipamentos e sistemas, principalmente em áreas onde a segurança é de extrema importância, como a indústria da aviação ou usinas nucleares, motivou a pesquisa de métodos automatizados de diagnose de falha.

A diagnose faz parte do processo de correção de falhas de um sistema. Este processo, segundo Lampis (2010), tem cinco etapas:

- 1) Detecção da falha: A ocorrência de uma falha normalmente é identificada através da leitura de sensores presentes no sistema. Estes sensores devem, portanto, registrar variáveis importantes à eficiência e segurança do sistema (como pressão e temperatura);
- 2) Diagnose da falha: Identificar a origem de uma falha poderia ser feita manualmente, através da inspeção dos componentes do sistema, mas se este for grande, complexo, ou necessite que a diagnose seja feita rapidamente por motivos de segurança, a utilização de um sistema de diagnose de falhas automatizado é necessário.
- 3) Avaliação da falha: As consequências ou potenciais consequências que uma falha pode provocar ao sistema devem ser analisadas. A falha pode, inclusive, ser classificada de acordo com sua severidade ou com o risco que representa.

- 4) Decisão: Após o reconhecimento da falha, uma decisão do que deve ser feito tem que ser tomada. O sistema pode ter sua operação totalmente interrompida para a correção da falha, se esta for grave, ou pode continuar a operar e a correção é adiada.
- 5) Eliminação da Falha: A falha é corrigida através do reparo ou substituição do componente e o sistema volta à operação.

Um Sistema de Diagnose de Falhas (SDF) pode ser implementado sob abordagens completamente diferentes, dependendo do método utilizado. É necessário, portanto, identificar as qualidades que um sistema de diagnose deve ter para que uma comparação entre os métodos possa ser feita.

Venkatasubramanian et al. (2003) listam uma série de características desejáveis em um Sistema de Diagnose de Falhas, das quais destacam-se:

- 1) Agilidade na detecção e diagnose: a redução do tempo gasto para a diagnose da falha é crítica em sistemas que oferecem riscos aos operadores e ao ambiente, além de contribuir na redução do tempo de manutenção;
- 2) Habilidade em discriminar diferentes falhas: o SDF deve listar os componentes que, isoladamente ou em conjunto, são os mais prováveis responsáveis pela falha do sistema;
- 3) Facilidade de elucidação: o sistema de diagnose deve explicar, de maneira simples, porque determinado componente ou conjunto de componentes é o responsável pela falha do sistema.
- 4) Habilidade de identificar falhas múltiplas: A queda no desempenho de um sistema pode ter origem na falha de um único componente ou em uma combinação de falhas de vários componentes, fato que deve ser considerado e identificado pelo SDF;
- 5) Robustez: os resultados apresentados pelo SDF devem sofrer pouca ou nenhuma interferência de ruídos presentes na leitura dos sensores e de incertezas em relação ao funcionamento do sistema monitorado;

- 6) Adaptabilidade: o SDF deve ser adaptável a mudanças no sistema monitorado, tanto em sua estrutura quanto em condições de operação.

Os métodos utilizados na implementação da diagnose de falhas, em geral, não atendem a todas essas características (Lampis, 2010). A escolha do método ou metodologia a ser utilizada em um determinado sistema deve ser feita mediante as necessidades do projeto.

3.3. Métodos Utilizados na Diagnose de Falhas

Nesta seção são apresentados três dos métodos utilizados no desenvolvimento de um sistema de diagnose de falhas: a Análise de Modos e Efeitos de Falha, a Análise de Árvore de Falhas e as Redes Bayesianas.

3.3.1 Análise de Modos e Efeitos de Falha

A Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA, do inglês “Failure Modes and Effects Analysis”) é uma técnica qualitativa para avaliação dos modos como um determinado componente pode falhar, bem como as causas dos mesmos e consequências de cada modo de falha para o sistema (Lewis, 1987).

Segundo Sundararajan (1991), a FMEA é utilizado com os seguintes objetivos:

- 1) Garantir que todos os possíveis modos de falha e seus respectivos efeitos sejam compreendidos;
- 2) Auxiliar na identificação de pontos fracos do projeto;
- 3) Fornecer uma base para a seleção de soluções alternativas a um determinado projeto que ainda está em suas etapas iniciais de desenvolvimento;
- 4) Fornecer uma base para recomendar melhorias ao projeto;

- 5) Fornecer uma base para a determinação de ações corretivas prioritárias;
- 6) Fornecer uma base para a recomendação de programas de teste para o sistema em estudo;
- 7) Auxiliar na solução de problemas existentes em sistemas que já estão em operação.

A elaboração da FMEA deve levar em conta a reflexão sobre cinco questões a respeito do sistema em estudo (Felix, 2006):

- 1) Como cada componente do sistema pode falhar?
- 2) Quais os efeitos desta(s) falha(s) sobre o sistema?
- 3) Quão críticos são estes efeitos?
- 4) Como detectar a falha?
- 5) Quais as medidas contra estas falhas (evitar, prevenir a ocorrência das mesmas ou minimizar seus efeitos)?

Para uma execução mais sistemática da técnica em um determinado sistema, é usual a tabulação das informações obtidas. Nessa tabela, os dados a serem preenchidos correspondem às seguintes características de cada componente do sistema: identificação; função; possíveis modos de falha; consequências de cada modo de falha; formas de detecção da falha; severidade da falha.

Segundo Lemes, 2006, caso a árvore funcional (AF) do sistema tenha sido desenvolvida previamente ao FMEA, os componentes considerados na análise são aqueles presentes nos ramos da base da AF.

Um exemplo de tabela empregada no desenvolvimento da FMEA é apresentado na Tabela 1. Nesta, as duas primeiras colunas tem o objetivo de identificar cada componente em estudo. Na terceira coluna, são descritas as funções desempenhadas pelo respectivo componente. Na quarta coluna, são listados os modos de cada falha que o componente pode apresentar, bem como suas causas.

Tabela 1 - Tabela para a elaboração do FMEA (Carazas, 2006)

Nº de Identificação	Nomenclatura	Função	Causas / Modos de Falhas	Fase / Modo de Operação	Efeitos			Método de Detecção de Falhas	Medidas Preventivas / Corretivas	Severidade
					Locais	Próximo Nível	Níveis Finais			

Nas próximas quatro colunas, por sua vez, são discutidas as consequências de cada modo de falha da coluna anterior sobre a operação do sistema, considerando desde efeitos locais até efeitos no sistema como um todo.

A nona e a décima colunas apresentam possíveis métodos de detecção da falha descrita e medidas de manutenção, preventiva ou corretiva, que evitem a propagação da falha. A última coluna classifica a severidade da falha, que expressa o efeito da mesma no sistema como um todo. A norma ISO 9000 classifica a severidade de uma determinada falha em dez categorias diferentes, apresentadas na Tabela 2.

Outras informações podem também ser apresentadas na tabela do FMEA como, por exemplo, a taxa de falhas. Segundo Sundararajan, 1991, alguns dos itens presentes na tabela do FMEA podem ser omitidos ou deixados em branco, dependendo do objetivo da análise e das informações disponíveis sobre o sistema.

Tabela 2 - Classificação da Severidade Conforme Norma ISO 9000 (Souza, 2008)

Classificação		Descrição
1	Sem Efeito	Nenhum efeito no produto ou processos subsequentes
2	Efeito Muito Leve	O cliente provavelmente não observa a falha. Efeito muito pequeno ou insignificante no desempenho do produto/processo. Falha não vital observada às vezes.
3	Efeito Leve	Cliente ligeiramente irritado. Efeito pequeno no desempenho do produto/processo. Falha não vital observada na maioria das vezes.
4	Efeito Menor	Cliente sente o menor incômodo. Efeito moderado no desempenho do produto/processo. Falha não vital é observada, sempre.
5	Efeito Moderado	O cliente sente algum descontentamento. Efeito moderado no desempenho do produto/processo. A falha na parte não vital do produto/processo requer reparo.
6	Efeito Significante	O cliente sente desconforto. O desempenho do produto/processo degradou, mas este ainda é operável e seguro. Peça não vital inoperável
7	Efeito Maior	Cliente descontente. Efeito no processo; retrabalho/reparo na parte necessária. Desempenho do produto/processo afetado severamente, mas funciona e é seguro. Subsistema inoperante
8	Efeito Extremo	Cliente muito descontente. Efeito extremo no produto/processo, que fica inoperável, embora seguro.
9	Efeito Sério	Efeito potencial perigoso. Capaz de parar o produto/processo sem acidente; segurança relacionada; falha dependente do tempo. Rompimento nas operações do processo subsequente. O cumprimento com regulamento do governo está em risco.
10	Efeito Perigoso	Efeito perigoso. Segurança relacionada, falha repentina. Sem cumprimento com regulamento do governo.

As tabelas obtidas a partir da realização do FMEA podem ser usadas para determinar pontos críticos no projeto do sistema ou para identificar a causa de uma falha dado o efeito observado (Isermann, 2006). A grande vantagem da FMEA é sua completude, já que considera e analisa todos os componentes do sistema.

Porém, executar uma análise FMEA para um sistema pode consumir muito tempo da equipe de engenharia. Além disso, a principal limitação da FMEA é que sua análise considera cada modo de falha individualmente (Lampis, 2010, e Sundararajan, 1991). Ou seja, apesar de identificar o efeito que uma falha tem no sistema, esta análise não consegue prever o efeito gerado por duas ou mais delas, o que limita seu uso em diagnose de falhas.

O fato do FMEA não considerar falhas múltiplas limita sua utilização na diagnose falhas à aplicação em sistemas mais simples. Esta técnica pode, no entanto, ser combinada a outras de modo a obter um sistema de diagnose de falhas mais completo e otimizado.

Melani (2011) utiliza o FMEA para o desenvolvimento de um sistema de monitoração e diagnose de falhas para a etapa de moagem de cana de açúcar em destilarias de etanol. Price e Taylor (1997) propõem a automatização da geração das tabelas do FMEA para a diagnose de falhas para a identificação de falhas múltiplas através da utilização do software AutoSteve.

Case et al. (2010) utilizam a FMEA na criação de uma Ferramenta de Assistência ao Diagnóstico (do inglês “Diagnostic Service Tool”) para a análise de transmissões automáticas de automóveis. Barkai (1999) descreve a aplicação da FMEA, juntamente com Sistemas Especialistas, para a obtenção de um sistema de diagnóstico para veículos fora de estrada.

3.3.2 Análise de Árvore de Falhas

A Análise de Árvore de Falhas (FTA, do inglês “Fault Tree Analysis”) foi originalmente desenvolvida por H. A. Watson a fim de avaliar o sistema de controle de lançamento dos mísseis Minuteman e evitar um lançamento não autorizado (Lee et al, 1985). Constitui uma das principais técnicas para a análise de confiabilidade de sistemas e é amplamente utilizada em vários setores da indústria.

A FTA é um método dedutivo no qual um evento indesejado, chamado de evento topo, é definido e, a partir disso, as causas ou combinações de causas que possam levar à ocorrência deste evento são sistematicamente definidas.

Segundo Modarres et al (2010), a árvore de falhas é feita de modo que todos os modos de falha que contribuem para a ocorrência do evento topo sejam identificados. Esta análise permite incluir não só falhas individuais de cada componente, mas também erros humanos, de software e a interação entre eles.

A árvore de falhas em si é composta por eventos, incluindo o evento topo, e conectores lógicos ligando-os. A Tabela 3 apresenta os tipos de eventos utilizados em sua construção (símbolo e descrição). Já a Tabela 4 apresenta os conectores lógicos utilizados na árvore.

Assim, o conector lógico "E" (apresentado na Tabela 4), por exemplo, é utilizado para mostrar que todos os eventos de entrada devem ocorrer para que o evento de saída aconteça. Da mesma maneira, o conector "OU" mostra que a ocorrência do evento de saída se dá quando pelo menos um dos eventos de entrada acontecem.

Tabela 3 - Símbolos dos eventos da FTA (O'Connor, 2012; Kececioglu, 1991)

Símbolo	Descrição
O círculo representa um evento básico, ou seja, uma falha, e se apresenta na base da árvore. Esta falha ocorre de maneira independente a outras falhas.
Este símbolo representa uma falha dependente de outras falhas e o desenvolvimento para que ela ocorra é descrita em uma árvore de falha à parte.
O diamante representa um falha dependente de outras falhas, mas seu desenvolvimento não necessita de descrição.
O retângulo representa um evento, ou falha, que resulta da combinação dos eventos presentes um nível abaixo na árvore.
Este símbolo representa um evento condicional, que ocorre somente em circunstâncias específicas.
Os triângulos são eventos de transferência, ou seja, servem para indicar a repetição de uma parte da árvore.

A Análise de Árvores de Falha pode ser realizada tanto sob uma perspectiva qualitativa quanto sob uma quantitativa. Sob uma óptica qualitativa, obtém-se a origem do evento topo através da identificação dos cortes mínimos (do inglês “cut sets”). Sob uma óptica quantitativa, obtém-se a probabilidade de ocorrência do evento topo (ou probabilidade de falha do sistema) a partir das probabilidades de falha de cada componente/evento presente na base da árvore.

Tabela 4 - Conectores Lógicos da FTA (O'Connor, 2012; Kececioglu, 1991)

Conector	Descrição
Conector Lógico “E” (AND) – O evento de saída (ligado à parte superior do conector) acontece somente se todos os eventos de entrada (ligados à parte inferior do conector) acontecerem.
Conector Lógico “OU” (OR) – O evento de saída (ligado à parte superior do conector) acontece se pelo menos um dos eventos de entrada (ligados à parte inferior do conector) acontecerem.
Conector Lógico “OU Mínimo” - O evento de saída (ligado à parte superior do conector) acontece se pelo menos ‘m’ eventos de entrada (ligados à parte inferior do conector) acontecerem.
Conector Lógico “OU Exclusivo” - O evento de saída (ligado à parte superior do conector) acontece se apenas um dos eventos de entrada (ligados à parte inferior do conector) acontecerem.
Conector Lógico “E Prioritário” - O evento de saída (ligado à parte superior do conector) acontece somente se os eventos de entrada (ligados à parte inferior do conector) acontecerem em uma ordem específica (em geral, da esquerda para a direita).
Conector Inibidor - O evento de entrada (ligado à parte inferior do conector) provoca o evento de saída (ligado à parte superior do conector) somente se o evento condicional (ligado à direita do conector) acontecer.

A FTA é amplamente utilizada para análise de confiabilidade e segurança, mas também tem sido aplicada na área de diagnose de falhas de sistemas. Hurdle et al (2005) utilizaram árvores de falhas no desenvolvimento de uma diagnose de falhas de um sistema usando leituras de sensores nele presente como eventos topo das árvores de falhas.

Uma das vantagens da FTA é a possibilidade de trabalhar com a ocorrência de falhas múltiplas. Porém, o fato dos eventos serem binários e estatisticamente independentes, segundo Bobbio et al. (2001), pode limitar a representação do sistema através da árvore de falhas.

3.3.2.1. Árvore de Falhas Não Coerentes

Apesar da maioria dos trabalhos que utilizam FTA se restringirem à utilização dos operadores lógicos E (AND) e OU (OR), é possível ampliar o leque de operadores com a utilização da lógica da negação (NOT), o que é chamado de análise de árvore de falhas não coerente. FTA não coerentes consideram que uma falha do sistema pode se originar não apenas de uma combinação entre falhas de componentes, mas também entre componentes que apresentam falha e outros que operam normalmente (a negação de uma falha).

Segundo Andrews (2001), as objeções à incorporação de lógica NOT na árvore de falhas são filosóficas e práticas. Do ponto de vista filosófico, usar a lógica NOT significa que o fato de componentes não falharem podem contribuir para a ocorrência do evento topo (falha do sistema). Portanto, se um componente está em um estado de falha, a sua reparação pode causar a falha do sistema. Tal fato é contra o que poderia ser considerado como razoável, sendo o motivo pelo qual esta análise é chamada de não coerente.

Do ponto de vista prático, a FTA não coerente aumenta a complexidade das análises quantitativa e qualitativa feitas através da árvore (Sharvia e Papadopoulos, 2008). A quantidade de modos de falha do sistema e de cortes mínimos pode aumentar consideravelmente, tornando a avaliação qualitativa da árvore impraticável (Andrews, 2001).

Porém, a FTA não coerente permite que uma análise mais precisa do sistema em estudo seja realizada. A não utilização da lógica NOT, por

desconsiderar a contribuição de um componente que não falhou para a ocorrência do evento topo, nem sempre fornece as corretas causas da falha do sistema.

Andrews (2001) demonstrou que a FTA não coerente pode ser muito útil na análise de sistemas que realizam mais de uma tarefa ("multitask systems"). Neste caso, a falha do sistema deve ser analisada considerando tanto as tarefas que podem estar sendo realizadas quanto as que podem não estar, simultaneamente.

Contini et al. (2008) utilizaram lógica de negação ("NOT logic", no inglês) para a construção de árvores de falhas na modelagem de sistemas de segurança e mostrou que os resultados obtidos podem ser mais completos com essa abordagem.

Hurdle et al. (2005) utilizaram tanto FTA coerentes quanto FTA não coerentes para a diagnose de falhas de um sistema de controle de nível de um tanque. Para tal, os eventos topo das árvores criadas correspondiam às leituras dos sensores que fugiam do valor esperado. A análise provou que a utilização de árvores de falhas não coerentes para representar as causas de leitura de sensores fornecem resultados mais confiáveis quando comparados com aqueles obtidos utilizando as árvores de falhas coerentes.

3.3.3. Redes Bayesianas

Redes Bayesianas são modelos gráficos que conseguem representar as dependências existentes entre as variáveis de um domínio, sendo, por este motivo, muito utilizadas na resolução de problemas de predição e diagnose. Surgiram no ramo da Inteligência Artificial nos anos 80 para facilitar análises nas quais existem incertezas (Pearl, 1988).

Para um melhor entendimento de como as Redes Bayesianas serão utilizadas neste trabalho, os tópicos a seguir descrevem conceitos básicos sobre estatística bayesiana e probabilidade condicional. A seguir, são apresentadas a

definição e propriedades das Redes Bayesianas, bem como sua utilização em diagnose de falhas.

3.3.3.1. Probabilidade sob a ótica bayesiana

De acordo com IEC (2009), na Estatística Bayesiana, uma probabilidade é um grau de crença ou confiança que uma pessoa tem sobre um determinado evento. Essa interpretação subjetiva de probabilidade difere da interpretação frequentista, que relaciona probabilidade à frequência relativa de acontecimento de determinado evento. O subjetivismo da abordagem bayesiana permite que incertezas sejam reduzidas a medidas de probabilidade.

Para que a definição de probabilidade apresentada possa ser utilizada neste trabalho, é necessária uma introdução a conceitos como estados, eventos, espaços amostrais e variáveis aleatórias, bem como aos axiomas que regem a teoria da probabilidade.

Estados são todos os possíveis resultados de um experimento, enquanto o espaço amostral, ou espaço de possibilidades, é o conjunto de todos os estados de um dado experimento (Cozman, 2009). Por exemplo, se um dado de seis faces é lançado ao acaso, o espaço amostral Ω é dado por $\Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, onde cada elemento deste conjunto é chamado estado. Vale notar que estados são mutuamente exclusivos.

Um evento é um subconjunto de um espaço amostral (Cozman, 2009). Assim, ao lançamento de um dado, o evento "obter um número par" é representado por $A = \{2, 4, 6\}$.

Uma variável aleatória, ou apenas variável, é qualquer função $X: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, sendo $\mathbb{R}$ o conjunto dos números reais. Ou seja, a variável aleatória associa estados do espaço amostral a valores numéricos. Dado um estado w do espaço amostral Ω , é possível dizer que $\{w \in \Omega \mid X(w) = x\}$, onde x é um valor particular da variável aleatória X .

Na teoria de probabilidade, a probabilidade de um dado evento E , denotada como $P(E)$, é definida de tal maneira que satisfaz os axiomas da probabilidade, também conhecidos como axiomas de Kolmogorov.

De acordo com Jensen e Nielsen (2007), os três axiomas são:

Axioma 1 – Para qualquer evento E pertencente a um espaço amostral S , a probabilidade deste evento, $P(E)$, é não negativa, como mostra a equação a seguir.

$$P(E) \geq 0 \quad (1)$$

Axioma 2 – Dado um evento E que com certeza irá acontecer, este terá probabilidade unitária.

$$P(E) = 1 \quad (2)$$

Axioma 3 – Se os eventos $E_1, E_2, \dots$, são disjuntos ($E_1 \cap E_2 \cap \dots = \emptyset$), então a probabilidade do evento resultante da união entre eles é a soma das probabilidades de cada um dos eventos.

$$P(E_1 \cup E_2 \cup \dots) = \sum_{i=1}^{\infty} P(E_i) \quad (3)$$

A partir dos axiomas de Kolmogorov descritos acima, é possível deduzir que o valor da probabilidade de um evento E deve estar entre 0 e 1.

$$0 \leq P(E) \leq 1 \quad (4)$$

Além disso, a probabilidade de dois eventos E_1 e E_2 não disjuntos é dada pela equação a seguir.

$$P(E_1 \cup E_2) = P(E_1) + P(E_2) - P(E_1 \cap E_2) \quad (5)$$

3.3.3.2. Probabilidade Condicional

De acordo com Pearl (1988), probabilidade condicional refere-se à probabilidade de um evento A acontecer sabendo-se da ocorrência de outro evento B , ambos pertencentes ao mesmo espaço amostral. Essa probabilidade condicional de A dado B , representada por $P(A|B)$, é dada por:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (6)$$

Da mesma forma, a probabilidade condicional de B dado A é dada por:

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} \quad (7)$$

As Equações 6 e 7 podem ser reescritas de uma maneira diferente, denominada Regra do Produto, apresentada nas equações a seguir:

$$P(A \cap B) = P(A|B).P(B) \quad (8)$$

$$P(A \cap B) = P(B|A).P(A) \quad (9)$$

Igualando as equações anteriores isolando o termo $P(A|B)$, obtém-se o Teorema de Bayes:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A).P(A)}{P(B)} \quad (10)$$

Analizando a equação anterior, é possível concluir que o Teorema de Bayes atualiza o nosso conhecimento sobre um evento A dado que foi obtida uma informação sobre o evento B. Por essa razão, de acordo com Jensen e Nielsen (2007), $P(A)$ é chamada de probabilidade *a priori* (informação antes do acontecimento de B) e $P(A|B)$ é chamada de probabilidade *a posteriori* (informação depois do acontecimento de B).

Do Teorema de Bayes decorre que, se a ocorrência de um evento A não é alterada pela de B, esses eventos são denominados independentes, e as probabilidades *a priori* e *a posteriori* são iguais:

$$P(A|B) = P(A) \quad (11)$$

Observando as Equações (8) e (11), é possível concluir que, se A e B são independentes, então:

$$P(A \cap B) = P(A).P(B) \quad (12)$$

3.3.3.3. Tabela de Probabilidades Condicionais e Probabilidade Conjunta

Assim como a probabilidade condicional foi definida anteriormente para eventos, é possível estender sua definição para variáveis. Assim, seja uma variável X com n estados, $x_1, x_2, \dots, x_n$, mutuamente exclusivos e exaustivos, a probabilidade de X estar no estado x_i é dada por $P(X = x_i)$ ou $P(x_i)$. Dada uma outra variável Y , que possui m estados, $y_1, y_2, \dots, y_m$, também mutuamente exclusivos e exaustivos, então $P(X|Y)$ contém todas as probabilidades condicionais $P(x_i|y_j)$.

A probabilidade condicional de uma variável dada uma outra variável é um conjunto de probabilidades com uma probabilidade para cada configuração dos estados das variáveis envolvidas. Essas probabilidades podem ser organizadas em uma tabela, denominada Tabela de Probabilidades Condicionais (CPT, do inglês "Conditional Probability Table"). A Tabela 5 apresenta um exemplo de CPT com $P(X|Y)$, onde X tem dois estados e Y tem três estados.

Tabela 5 - Exemplo de CPT (Jensen e Nielsen, 2007)

$P(x_i y_j)$	y_1	y_2	y_3
x_1	0,4	0,3	0,6
x_2	0,6	0,7	0,4

Assim como a definição de probabilidade condicional foi estendida a variáveis, é possível fazer o mesmo com a probabilidade conjunta, $P(X \cap Y)$, que também pode ser representada como $P(X, Y)$. Semelhante à $P(X|Y)$, $P(X, Y)$ contém todas as probabilidades conjuntas $P(x_i, y_j)$, que também podem ser representadas em uma tabela. A Tabela 6 apresenta um exemplo de probabilidades conjuntas $P(X, Y)$, onde A tem dois estados e B tem três estados.

Tabela 6 - Exemplo de tabela de probabilidades conjuntas (Jensen e Nielsen, 2007)

$P(x_i, y_j)$	y_1	y_2	y_3
x_1	0,16	0,12	0,12
x_2	0,24	0,28	0,08

Vale notar que, sendo os estados de cada uma das variáveis X e Y mutuamente exclusivas e exaustivas, $P(X,Y)$ acaba por representar todo o domínio em estudo, já que:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(x_i, y_j) = 1 \quad (13)$$

De acordo com Maturana (2010), para domínios muito complexos (com muitas variáveis ou com variáveis que possuam muitos estados, por exemplo), sua representação através da tabela de probabilidades conjuntas torna-se inviável. A necessidade de uma representação mais simples pode ser suprida pela utilização de Redes Bayesianas. Isso acontece porque as Redes Bayesianas levam em consideração as relações de dependência entre as variáveis.

3.3.3.4. Definição de Rede Bayesiana

Uma Rede Bayesiana é um grafo direcionado no qual nós representam as variáveis de um universo e arcos representam as dependências entre eles. As especificações de uma RB são dadas a seguir (Norvig e Russell, 2010):

- 1) Cada nó representa uma variável aleatória, a qual pode ser discreta ou contínua;
- 2) Um conjunto de linhas direcionadas, ou arcos, conectam os nós aos pares. Se existir um arco de um nó X ao nó Y , designa-se o nó X como o pai do nó Y . O grafo não possui ciclos direcionados, ou seja, uma RB é um grafo acíclico direcionado (DAG, do inglês "directed acyclic graph");

- 3) Cada nó X_i tem uma distribuição de probabilidade condicional, dada por $P(X_i | \text{Pais}(X_i))$, que quantifica o efeito do nó pai no nó filho.

Segundo Neapolitan (2004), uma RB contém um componente qualitativo, representado pela topologia do grafo, e um componente quantitativo, representado pelas probabilidades condicionais associadas a cada nó do DAG.

A presença de um arco conectando dois nós pode ser interpretada como uma influência direta que o nó pai exerce no nó filho. Segundo Norvig e Russell (2010), isso sugere que causas devem ser os nós pais e efeitos devem ser os nós filhos. A Figura 21 mostra um exemplo de uma Rede Bayesiana básica. Nela, o nó C é dito pai dos nós E e B, B é pai de D e E e o nó A é independente dos outros nós.

Figura 21 - Exemplo de Rede Bayesiana

Fonte: Própria

Além da topologia da RB, é necessário definir um conjunto de probabilidades condicionais para cada variável, ou nó, de forma a especificar, quantitativamente, a influência dos nós pais sobre os nós filhos. Se as variáveis forem discretas, tais probabilidades condicionais podem ser apresentadas em uma Tabela de Probabilidades Condicionais. Nela, cada linha contém a probabilidade condicional do nó em questão, dada uma possível combinação de valores que os nós pais podem assumir.

Como exemplo, na Figura 22 são apresentadas as CPTs de cada nó. Para um melhor entendimento, todos os nós são binários, ou seja, têm apenas dois

estados mutuamente excludentes (verdadeiro, v, ou falso, f). É possível perceber, analisando as CPTs, que a probabilidade de um nó ser verdadeiro ou falso depende do estado em que seus nós pais se encontram. Além disso, vale ressaltar que o tamanho da tabela de probabilidades condicionais depende de quantos pais um determinado nó tem. Isso significa que, quanto maior o número de pais ou de estados que cada pai pode assumir, o tamanho da CPT será exponencialmente maior.

Figura 22 - Exemplo de Rede Bayesiana com as CPTs de cada nó

Fonte: Própria

As Redes Bayesianas conseguem representar de maneira completa o domínio em estudo, assim como a tabela de probabilidades conjuntas. Suponha uma RB que representa as relações de dependência das n variáveis de um domínio, $X_1, \dots, X_n$. Tem-se, então, pela regra do produto (Norvig e Russell, 2010):

$$P(x_1, \dots, x_n) = P(x_n | x_{n-1}, \dots, x_1) P(x_{n-1}, \dots, x_1) \quad (14)$$

onde $P(x_1, \dots, x_n)$ é o mesmo que $P(X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n)$. Reaplicando a regra do produto n vezes, obtém-se:

$$P(x_1, \dots, x_n) = P(x_n|x_{n-1}, \dots, x_1)P(x_{n-1}|x_{n-2}, \dots, x_1) \dots P(x_2|x_1)P(x_1) \quad (15)$$

A equação 15 pode ser reescrita da seguinte forma, chamada de Regra da Cadeia:

$$P(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i|x_{i-1}, \dots, x_1) \quad (16)$$

Considerando a topologia da RB, a Equação 16, equivalente à 15, pode ser mais uma vez reescrita da maneira a seguir:

$$P(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i|Pais(X_i)) \quad (17)$$

A Equação 17 é verdadeira apenas se $Pais(X_i) \subseteq \{x_{i-1}, \dots, x_1\}$. Tal condição é satisfeita, segundo Norvig e Russell (2010), numerando-se os nós pais antes dos nós filhos.

Analisando a equação acima, é possível perceber que qualquer probabilidade conjunta pode ser obtida pela multiplicação de probabilidades condicionais presentes nas CPTs da Rede Bayesiana.

3.3.3.5. Independência entre nós na Rede Bayesiana

A topologia da Rede Bayesiana representa as relações de dependência entre as variáveis de um domínio. Analisando a rede, portanto, é possível determinar se um nó é dependente de outro. Tal identificação pode ser feita através de um entre três critérios existentes (Norvig e Russell, 2010):

- 1) Condição de Markov: um nó é condicionalmente independente de seus não descendentes dado seus nós pais. A Figura 23 exemplifica a condição de Markov. Neste caso, o nó A é dito independente de F e G, por exemplo, se forem conhecidos os valores dos nós B e C (pais de A). O nó A, porém não é independente, por exemplo, dos nós D e E, que são seus descendentes.

Figura 23 - Exemplo de Condição de Markov

Fonte: Adaptado de Maturana (2010).

- 2) Cobertor de Markov: um nó será condicionalmente independente de todos os outros nós da rede, com exceção de seus pais, seus filhos e os outros pais de seus filhos se estes forem dados. A Figura 24 ilustra um Cobertor de Markov. Nela, se os nós B, C, D, E, F e G forem conhecidos, o nó A será independente de todos os outros nós da rede, isso porque B e C são os pais de A, F e G são os filhos de A e D e E são os outros pais dos filhos de A. O conjunto de nós formado por A, B, C, D, E, F e G, neste caso, é denominado Cobertor de Markov.

Figura 24 - Exemplo de Cobertura de Markov

Fonte : Adaptado de Maturana (2010).

- 3) D-Separação: dois nós A e B serão independentes entre si se existir uma d-separação entres eles, ou seja, se eles forem d-separados. Para que A e B sejam considerados d-separados, uma entre três condições deve ser satisfeita (exemplificadas, respectivamente, nas Figuras 25.a, 25.b e 25.c): A e B devem estar separados por um nó C, dado, que possui um arco de entrada e um de saída; A e B deve estar separados por um nó C, dado, que possui dois arcos de saída; ou A e B devem estar separados por um nó C que possui dois arcos de chegada.

Figura 25 - Exemplos de D-Separação

Fonte: Adaptado de Maturana (2010).

3.3.3.6. Inferência na Rede Bayesiana

A Rede Bayesiana permite que a probabilidade de certa variável seja atualizada através da observação do estado de uma outra variável, ou seja, possibilita o cálculo da probabilidade a posteriori. Este processo, denominado inferência, pode ser realizado com três objetivos diferentes (Maturana, 2010):

- 1) Causas: dadas as causas, calculam-se as probabilidades dos efeitos;
- 2) Diagnósticos: dados os efeitos, calculam-se as probabilidades das causas;
- 3) Intercausais: dada uma causa, calcula-se a probabilidade de outra causa.

A Figura 26 mostra Redes Bayesianas que exemplificam os três objetivos da realização de uma inferência. Vale lembrar que, na RB, nós pais representam causas e nós filhos, efeitos.

Figura 26 - Inferência

Fonte: Maturana (2010)

A inferência pode ser realizada através de algoritmos que, por sua vez, podem obter soluções exatas ou aproximadas. A vantagem de se utilizar algoritmos que calculam soluções aproximadas é que o tempo de processamento é muito menor, tornando-se fundamental em casos onde as RBs são muito complexas.

Para a execução da inferência exata, sendo X a variável que se deseja calcular a probabilidade *a posteriori*, E a lista de variáveis de evidência (e é a lista de valores observados para estas variáveis) e Y a lista de variáveis não observadas (y é a lista de valores possíveis para estas variáveis), tem-se que:

$$P(X|e) = \frac{P(X, e)}{P(e)} = \alpha P(X, e) \quad (18)$$

onde $\alpha = 1/P(e)$. A equação acima pode ser reescrita da seguinte maneira (Norvig e Russell, 2010):

$$P(X|e) = \alpha \sum_y P(X, e, y) \quad (19)$$

A probabilidade *a posteriori*, portanto, é obtida a partir das CPTs e da Equação 17, que fornecem o termo $P(X, e, y)$. Analisando a Equação 19, é fácil

perceber que, com o aumento da complexidade da Rede Bayesiana, o somatório presente na equação torna sua utilização computacionalmente muito dispendiosa. Existem técnicas que simplificam esse cálculo, como a de eliminação de variáveis (Norvig e Russell, 2010), mas em redes muito complexas nem essas técnicas conseguem tornar a inferência exata viável.

A inferência aproximada diminui o tempo de processamento da probabilidade *a posteriori* através da utilização de simulação estocástica. Norvig e Russell (2010) apresentam algoritmos utilizados para a realização da inferência aproximada.

3.3.3.7. Rede Bayesiana na Diagnose de Falhas

Além de serem excelentes para a representação da relação entre falhas de componentes e seus efeitos no sistema, as Redes Bayesianas são ferramentas muito recomendadas para modelar sistemas de diagnose, já que o processo de inferência permite a identificação das possíveis causas destes efeitos.

Mechraoui et al. (2008) e Xu (2012) desenvolvem Redes Bayesianas através do conhecimento de especialistas do sistema em estudo e, através de inferência, conseguem identificar as possíveis causas de um desvio na leitura de um sensor do sistema. Vale ressaltar que estes trabalhos também se aproveitam do fato de a RB conseguir representar incertezas quanto ao comportamento do sistema.

Segundo Lampis (2010), não existe uma maneira estruturada para a construção de uma Rede Bayesiana, além de ser difícil obter as probabilidades condicionais presentes nas CPTs. Em geral, são desenvolvidas através de *brainstorms* com especialistas, que devem levar em consideração todos os fatores que podem influenciar no resultado da diagnose de falhas. Para contornar essas dificuldades, Hamada et al (2008), Bobbio et al (2001) e Lampis e Andrews (2008) utilizam a Análise de Árvores de Falhas como apoio à construção das

RBs. O tópico a seguir apresenta como a FT pode colaborar no desenvolvimento de Redes Bayesianas.

3.3.3.8. Conversão de Árvores de Falhas em Redes Bayesianas

Árvores de Falha podem ser facilmente convertidas em Redes Bayesianas. Hamada et al (2008), Bobbio et al (2001) e Lampis e Andrews (2008) apresentam detalhadamente como este processo de conversão deve ser feito.

Para a conversão de uma FT em uma RB, o primeiro passo a ser dado é a criação de um nó para cada evento da FT. Os eventos que eram conectados através de conectores lógicos na árvore de falha devem, na Rede Bayesiana, ser conectados diretamente através dos arcos direcionados, como mostra a Figura 27. Se eventualmente algum elemento (falha) aparece mais de uma vez na FT, ele deverá ser representado apenas uma vez na RB, situação representada pelo nó B na figura citada.

Figura 27 - Conversão da Árvore de Falhas em Rede Bayesiana

Fonte: Própria

A seguir, devem ser construídas as tabelas de probabilidades condicionais de cada um dos nós criados. Para tal, os nós presentes na RB deverão ser variáveis booleanas, dada a natureza da FT. O modo como as CPTs devem ser construídas está condicionado ao tipo de porta lógica presente na árvore de falhas. As Figuras 28 e 29 apresentam, respectivamente, como deve ser a CPT de um evento topo de uma árvore de falhas que utiliza um conector lógico "E" e de uma árvore de falhas que utiliza um conector lógico "OU".

Figura 28 - Conversão de um conector lógico "E"

Fonte: Própria

Figura 29 - Conversão de um Conector Lógico "OU"

Fonte: Própria

A última etapa da conversão da FT em RB é fornecer aos nós raízes (que não possuem nós pais) suas probabilidades *a priori*. Como os eventos básicos da FT corresponde à falhas de componentes do sistema em estudo, as probabilidades *a priori*, neste caso, são as probabilidades de falha destes componentes. Tais probabilidades podem ser obtidas através de bancos de dados ou a partir da opinião de especialistas.

Após a conversão, a RB permite que a probabilidade de acontecimento do evento topo (a probabilidade de falha do sistema) seja calculada. Além disso, é possível o cálculo das probabilidades *a posteriori* dos nós raízes dado, por exemplo, que o evento topo ocorreu.

Uma vez feita a conversão, é possível utilizar as propriedades da RB para aprimorar a rede. Diferentemente da FT, a RB não exige seus eventos, ou nós, sejam discretos e nem que as relações entre eles sejam determinísticas. Esta característica pode ser utilizada em um sistema de diagnose de falhas para, por exemplo, incluir no modelo as incertezas quanto às leituras dos sensores utilizados, como poderá ser observado no item 5.5.3 deste trabalho.

4 METODOLOGIA

Este capítulo descreve o método proposto para realização da diagnose de falhas do sistema de carga e descarga de um navio metaneiro. Inicialmente, as etapas que constituem o método são apresentadas e, a seguir, descritas com maior detalhe.

4.1. O método proposto

O objetivo do método proposto é realizar uma diagnose de falhas para o sistema de carga e descarga de GNL de um navio metaneiro. A diagnose é realizada através da modelagem do sistema em estudo. Para a construção de um modelo teórico, é necessário um profundo conhecimento do funcionamento de todos os componentes do sistema.

Decidiu-se, portanto, mesclar técnicas advindas da análise de confiabilidade, como FMEA e FTA, com outra proveniente da área de inteligência artificial, a Rede Bayesiana, a fim de criar um processo sistemático para a construção do modelo do sistema. Com isso, pretende-se aproveitar as vantagens oferecidas por cada uma dessas técnicas para obter um sistema de diagnose de falhas mais completo e preciso. O método proposto foi baseado naqueles apresentados por Lampis (2010) e Hurdle et al.(2005).

O método proposto é composto por seis etapas:

- 1) Na primeira etapa, um estudo do sistema de carga e descarga é realizado e a descrição de sua operação é feita;
- 2) A segunda etapa consiste na construção da Árvore Funcional do sistema em estudo, acompanhada da respectiva Descrição Funcional;

- 3) Na terceira etapa, é realizado um estudo dos modos e efeitos das falhas de cada componente do sistema de carga e descarga, através da técnica FMEA;
- 4) A quarta etapa constitui-se no desenvolvimento de Árvores de Falhas a partir dos dados obtidos na etapa anterior. O evento topo destas FTs são as possíveis leituras dos sensores presentes no sistema;
- 5) Na quinta etapa, são desenvolvidas Redes Bayesianas, baseadas nas FTs da etapa anterior, que permitem detectar a origem de falhas a partir da leitura de sensores;
- 6) A sexta etapa consiste na validação dos resultados obtidos a partir da simulação de falhas no modelo obtido do sistema em estudo.

A Figura 30 mostra, esquematicamente, as etapas do método proposto. As próximas seções deste capítulo têm como objetivo elucidar a importância de cada etapa utilizada no método.

Figura 30 - Etapas do Método Proposto

Fonte: Própria

4.2. Árvore Funcional e Descrição Funcional

A diagnose de falhas baseada em um modelo do sistema em estudo exige um profundo conhecimento do funcionamento de todos os seus componentes. É por isso que, além de uma descrição do sistema, realizada na primeira etapa do método proposto, é recomendável o desenvolvimento de uma Árvore Funcional.

O objetivo de uma Árvore Funcional (AF) é estruturar, de maneira lógica e hierarquizada, a interdependência entre os diferentes componentes de um sistema, de modo a expor como este executa suas funções.

A construção da Árvore Funcional deve ser sistematizada, apoiando-se não só na inter-relação entre os componentes do dado sistema, mas também na descrição das funções de cada um desses (Lemes, 2006). É por isso que a execução da AF deve ser acompanhada da Descrição Funcional (DF) dos componentes do sistema. Na DF, as funções principais de cada componente e subsistema do sistema são listadas.

Segundo Souza (2008) e Carazas (2011), para a construção da Árvore Funcional deve-se, depois de listados os componentes e subsistemas do sistema em estudo e definidas suas respectivas funções, responder as seguintes perguntas:

- 1) Como é executada (cumprida) uma determinada função?
- 2) Porque uma determinada função deve ser executada?

Tendo como nível primário o sistema em estudo, a resposta à primeira pergunta corresponde aos subsistemas responsáveis pela execução da função deste sistema e devem ser posicionados no nível secundário da árvore, como mostra a Figura 31. A primeira pergunta é, então, repetida para cada subsistema do nível secundário e assim por diante, até que obtenha-se, nos últimos níveis, todos os componentes responsáveis pela execução de funções básicas.

O objetivo da segunda pergunta é garantir que a Árvore Funcional obtida está correta. Partindo-se da função dos componentes presentes nos últimos níveis da árvore, a resposta à segunda pergunta deve corresponder à função do nível

imediatamente acima, ou seja, verifica-se a necessidade de determinado componente presente no sistema.

Figura 31 - Arranjo Geral de uma Árvore Funcional

Fonte: Carazas (2011)

4.3. FMEA

A próxima etapa do método é a realização da FMEA. Assim, além de conhecer quais os componentes do sistema e suas respectivas funções, será possível entender quais as falhas que eles podem apresentar e como estas afetam o sistema como um todo. A FMEA deve ser realizada para cada componente presente nos últimos níveis da Árvore Funcional.

A Análise de Modos e Efeitos de Falha será desenvolvida utilizando a tabela apresentada por Hidalgo (2011), composta por cinco colunas como indicado na Tabela 7: na primeira coluna, será identificado cada componente pertencente ao sistema; na segunda coluna, haverá uma descrição resumida da função que este componente executa; na terceira coluna, apresentar-se-á cada modo de falha potencial do componente; na quarta, estarão descritas as causas e mecanismos potenciais que geraram a falha da coluna anterior; por fim, na quinta coluna, os possíveis efeitos ou consequências (locais ou globais) da falha serão descritos.

Tabela 7 - Formulário empregado na análise FMEA (adaptado de Hidalgo, 2010)

Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível (is) Efeito(s) da falha

4.4. Árvore de Falhas

Após o desenvolvimento do FMEA para cada um dos componentes responsáveis pela carga e descarga do navio, dar-se-á a execução da FTA. Nas árvores de falhas a serem construídas, o evento topo deverá corresponder a uma leitura inesperada de um sensor presente no sistema e os eventos básicos corresponderão aos modos de falha dos componentes que podem ser a causa de tal medição. Serão construídas árvores de falhas para todos os sensores presentes no sistema.

Assim, por exemplo, se um sensor de fluxo de fluido não detecta vazão em uma determinada tubulação do sistema, o evento topo da árvore será "não há fluxo" e, dentre um dos eventos básicos, lista-se a falha em uma válvula responsável por permitir este fluxo. A Figura 32 ilustra a situação.

A construção das árvores de falhas, portanto, será apoiada pelos resultados obtidos na análise FMEA, que forneceu os efeitos que a falha de um componente pode ter no sistema e seus respectivos modos de falha.

Figura 32 - Exemplo de FT a ser desenvolvida

Fonte: Própria

Ademais, seguindo a recomendação de Hurdle et al. (2005) e Lampis (2010), serão utilizadas Árvores de Falhas Não Coerentes neste trabalho. As FTs Não Coerentes incluem a lógica de negação (porta lógica "NOT") em seu desenvolvimento, ou seja, tanto eventos de falha quanto eventos de não falha dos componentes podem aparecer na árvore.

O uso de FTs Não Coerentes, apesar de mais complexas, incluem mais informações sobre o sistema na análise. Por exemplo, se a leitura de um sensor garante o funcionamento de um componente, sua falha deve ser excluída das possíveis causas da medição de outro sensor, como mostrado por Andrews (2005).

4.5. Redes Bayesianas

A próxima etapa no desenvolvimento do sistema de diagnose de falhas é a conversão das FTs obtidas em Redes Bayesianas. O processo de conversão foi apresentado na seção 3.3.3.8 deste trabalho. O software utilizado para o desenvolvimento das RBs é o Agena Risk (Agena Risk, 2014).

Após a conversão de cada uma das árvores de falhas, haverá uma Rede Bayesiana para cada sensor presente no sistema. Para a realização da diagnose de falhas, essas redes deverão ser unificadas em uma única rede. Esta unificação dar-se-á através da inserção das redes obtidas no mesmo arquivo do software utilizado. Se a falha de um componente aparece em redes diferentes, os nós correspondentes a ela deverão ser substituídos por apenas um nó.

A Figura 33 mostra como a Rede Bayesiana obtida será utilizada para a diagnose de falhas. Os nós correspondentes às falhas dos componentes recebem os valores de suas respectivas confiabilidades e os nós que representam as leituras dos sensores devem receber qual a leitura observada (no caso de um sensor de temperatura, por exemplo, essa leitura pode ser "dentro do esperado" ou "acima do esperado").

Com essas informações e através dos cálculos de inferência bayesiana, a rede fornece a probabilidade *a posteriori* dos componentes do sistema. Essas probabilidades fornecem a chance de cada componente ser o responsável por uma leitura do sensor fora do esperado.

A utilização de Redes Bayesianas se deu devido à facilidade com que ela permite que o cálculo da probabilidade *a posteriori* seja feito, além de conseguir unificar todas as árvores de falhas obtidas, o que permite que estas sejam analisadas simultaneamente. Ademais, a RB elimina as limitações impostas pelo determinismo presente nas portas lógicas da FTA, permitindo que incertezas sejam inseridas na análise. Por exemplo, a incerteza quanto à leitura de um sensor pode ser considerada através da inserção de sua respectiva confiabilidade na TPC do nó correspondente na RB.

Figura 33 - Uso da Rede Bayesiana na Diagnose de Falhas

Fonte: Própria

Por fim, a última etapa consiste na validação do método. Para tal, serão inseridas, na Rede Bayesiana construída, evidências nos nós que representam a leitura dos sensores, obtendo a probabilidade *a posteriori* das falhas dos componentes. As possíveis causas das combinações de leituras dos sensores deverão ser listadas e analisadas.

5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NO SISTEMA DE CARGA E DESCARGA DO NAVIO METANEIRO

Este capítulo tem como objetivo apresentar a aplicação do método proposto no sistema em estudo. Cada um de seus subitens corresponde a uma etapa do método, como listado no capítulo anterior.

5.1. Descrição do Sistema

O sistema de carga e descarga de GNL em estudo pertence a um navio do tipo membrana GTT Mark III, com quatro tanques de armazenamento e capacidade total de transporte de 138.000 m³ de gás natural líquido.

A Figura 34 apresenta, esquematicamente, todos os componentes responsáveis pela carga e descarga de GNL. Na figura, estão representados os tanques de armazenamento, as tubulações de GNL, de Boil-off e válvulas responsáveis pelo controle da carga e descarga do líquido. A Tabela 8 apresenta uma legenda para os equipamentos utilizados no sistema e apresentados na Figura 34.

É possível perceber que o sistema responsável pelo transporte e manipulação de GNL do navio apresenta uma série de componentes em redundância passiva, como as bombas presentes no interior dos tanques de armazenamento e os compressores utilizados para a descarga de Boil-off.

Como o GNL é um fluido criogênico, todos os componentes utilizados para sua manipulação devem estar preparados para suportar baixas temperaturas. As bombas criogênicas presentes nos tanques de armazenamento, por exemplo, são bombas centrífugas submersas, construídas em alumínio, que operam a temperatura de -163°C. Durante o processo de descarga, sua vazão pode chegar a 1700 m³/h de GNL.

Figura 34 - Sistema de Carga e Descarga do Navio

Fonte: Adaptado de Silva (2013)

Tabela 8 - Legenda de Equipamentos da Figura 34

Símbolo	Descrição
Bomba de descarga de GNL
Compressor de Boil-off
Flange de Conexão com os Braços Criogênicos
Riser de saída do Boil-off
Válvula borboleta com atuador hidráulico tipo palheta sem regulação
Válvula borboleta com atuador hidráulico tipo pistão ativada pelo ESD
Válvula de globo com atuador hidráulico tipo palheta
Válvula borboleta com atuador pneumático tipo diafragma
Válvula borboleta com atuador tipo pistão com regulação variável
Válvula de alívio do tipo mola para GNL
Válvula de alívio tipo mola para Boil-off
Válvula de retenção ou anti-retorno
Válvula de retenção de haste roscada
Válvula de retenção com mola
Tubulação de Boil-off
Tubulação de GNL
Tubulação de Alívio
Sensor

Ainda em relação à Figura 34, as válvulas nomeadas com o prefixo CL correspondem àquelas responsáveis pela carga/descarga de GNL, enquanto que as nomeadas com o código CG correspondem àquelas responsáveis pela descarga de Boil-off. Já as válvulas CR são de alívio, responsáveis por limitar a pressão nas tubulações e tanques de armazenamento.

As válvulas de alívio presentes na tubulação de GNL se abrem quando a pressão desta atinge 10 bar, permitindo que o GNL retorne aos tanques de armazenamento e evitando o comprometimento do sistema. Já as válvulas de alívio presentes nos tanques se abrem quando a pressão do Boil-off atinge 250 mbar, permitindo que o gás saia pelos risers.

Os compressores têm como objetivo aumentar a pressão do Boil-off para facilitar o seu envio ao terminal. A pressão de descarga é de 2 bar.

Os sensores PG1, PG2, PG3 e PG4 aferem a pressão do Boil-off no interior dos tanques. LI1, LI2, LI3 e LI4 medem o nível ou quantidade de GNL dentro dos tanques. PG5, PG6, PG7 e PG8 medem a pressão de Boil-off ao longo da tubulação de Boil-off. Por fim, PL1, PL2, PL3 e PL4 aferem a pressão do GNL na saída dos tanques.

Durante a carga de GNL no Tanque 1, as válvulas CL100 e CL107 devem permanecer abertas, enquanto que as válvulas CL101 e CL102 ficam fechadas. Já durante a descarga, as válvulas CL101 e CL107 ficam abertas enquanto CL102 e CL100 fechadas (considerando que a descarga seja realizada pela Bomba 1A e não pela 1B). O mesmo ocorre com os outros tanques e suas respectivas válvulas. As válvulas presentes no manifold devem estar todas abertas.

O Boil-off gerado durante a carga de GNL deve ser enviado ao terminal, mantendo uma pressão manométrica dentro dos tanques de 70 a 100 mbar. Para isso, as válvulas CG100, CG200, CG300, CG400, CG704, CG900 devem permanecer abertas. Se o compressor 1 estiver sendo utilizado, a válvula CG903 deve ser aberta e a CG904 fechada. A válvula do manifold CG071 também deve permanecer aberta.

Para facilitar a análise posterior, as tubulações do sistema foram segmentadas e nomeadas com o prefixo Tb.

5.2. Árvore Funcional e Descrição Funcional

A Árvore Funcional do sistema de carga e descarga de GNL do navio metaneiro é apresentada na Figura 35. É possível perceber que a árvore desenvolvida possui duas ramificações, o "Sistema de GNL", responsável pela carga ou descarga de GNL, e o "Sistema de Boil-off", responsável pela descarga de Boil-off que acontece simultaneamente à atuação do outro sistema. A AF desenvolvida consegue representar, de maneira lógica e hierarquizada, a interdependência entre os componentes do sistema em estudo.

Para tornar tal análise mais completa, foi desenvolvida uma Descrição Funcional do sistema, que lista a função principal de cada componente e subsistema apresentado na Árvore Funcional. A DF realizada encontra-se no Apêndice A.

Figura 35 - Árvore Funcional do Sistema de Carga e Descarga

Fonte: Própria

5.3. Análise de Modos e Efeitos de Falha

Após a realização da Árvore Funcional, seguiu-se a realização da Análise de Modos e Efeitos de Falha. A tabela FMEA utilizada foi àquela apresentada na Tabela 7 do capítulo 4.

A análise FMEA permitiu a obtenção de informações úteis sobre os modos que cada componente do sistema em estudo pode falhar e seus respectivos efeitos. Tais informações serão utilizadas para a elaboração das Árvore de Falha, etapa seguinte do método de diagnose de falha proposto neste trabalho.

As tabelas FMEA desenvolvidas para todos os componentes do sistema de carga e descarga do navio metaneiro encontram-se no Apêndice B. A título de exemplo, a Tabela 9 apresenta o FMEA dos tanques de armazenamento de GNL.

Tabela 9 - FMEA dos tanques de armazenamento

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Tanque (Tanques 1, 2, 3 e 4)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Tanque (Tanques 1, 2, 3 e 4)	Armazenar GNL e isolá-lo termicamente	Vazamento de GNL	1) presença de trincas	1) possível queda no nível de GNL do tanque 2) queda de temperatura no local do vazamento 3) presença de GNL no exterior do tanque 4) Sistema de Carga e Descarga do Navio opera em estado de falha
		Aquecimento não previsto do GNL	1) falha no isolamento térmico do tanque	1) queda de temperatura na região externa ao isolamento 2) aumento da geração de Boil-off no interior do tanque 3) possível aumento de pressão do Boil-off no interior do tanque 4) Sistema de Carga e Descarga do Navio opera em estado de falha

5.4. Árvores de Falha

Após o desenvolvimento do FMEA para cada um dos componentes responsáveis pela carga e descarga do navio, dá-se a execução das árvores de falhas, cujo evento topo deverá corresponder a leituras fora do esperado de cada sensor presente no sistema e os eventos básicos corresponderão às falhas dos componentes que podem ser a causa de tal medição.

Para o circuito de Boil-off, foi analisado apenas o seu processo de descarga, que ocorre simultaneamente à carga de GNL e evita que a pressão nos tanques aumente. Levando em consideração os sensores presentes neste circuito, as leituras escolhidas para o desenvolvimento das árvores de falhas são listadas a seguir:

- PG1 indica pressão limite (250 mbar);
- PG2 indica pressão limite (250 mbar);
- PG3 indica pressão limite (250 mbar);
- PG4 indica pressão limite (250 mbar);
- PG1 indica pressão acima da limite;
- PG2 indica pressão acima da limite;
- PG3 indica pressão acima da limite;
- PG4 indica pressão acima da limite;
- PG5 indica pressão acima da limite;
- PG5 indica pressão abaixo da atmosférica;
- PG6 indica pressão acima do normal;
- PG6 indica pressão abaixo da normal.

Para os sensores presentes no circuito de GNL, as leituras escolhidas para o desenvolvimento das árvores de falha dependem da operação que está sendo realizada, isto é, carga ou descarga dos tanques. Isso ocorre porque o comportamento dos sensores devido a uma falha no circuito de GNL é influenciado pelo sentido do fluxo de GNL.

Portanto, se o processo que está sendo realizado é o de descarga dos tanques, as leituras escolhidas para o desenvolvimento das árvores de falhas são listadas a seguir:

- LI1 acima do esperado;
- LI2 acima do esperado;
- LI3 acima do esperado;
- LI4 acima do esperado;
- PL1 indica pressão limite (10 bar);
- PL2 indica pressão limite (10 bar);
- PL3 indica pressão limite (10 bar);
- PL4 indica pressão limite (10 bar);
- PL1 indica pressão acima da limite;
- PL2 indica pressão acima da limite;
- PL3 indica pressão acima da limite;
- PL4 indica pressão acima da limite;
- PL1 abaixo do esperado;
- PL2 abaixo do esperado;
- PL3 abaixo do esperado;
- PL4 abaixo do esperado.

Agora, se o processo que está sendo realizado é o de carregamento dos tanques, as leituras escolhidas para o desenvolvimento das árvores de falhas são listadas a seguir:

- LI1 abaixo do esperado;
- LI2 abaixo do esperado;
- LI3 abaixo do esperado;
- LI4 abaixo do esperado;
- PL1 indica pressão limite (10 bar);
- PL2 indica pressão limite (10 bar);

- PL3 indica pressão limite (10 bar);
- PL4 indica pressão limite (10 bar);
- PL1 indica pressão acima da limite;
- PL2 indica pressão acima da limite;
- PL3 indica pressão acima da limite;
- PL4 indica pressão acima da limite;
- PL1 abaixo do esperado;
- PL2 abaixo do esperado;
- PL3 abaixo do esperado;
- PL4 abaixo do esperado.

No total, foram construídas 48 árvores de falhas. A escolha de quais árvores seriam desenvolvidas foi diretamente influenciada pelas informações obtidas sobre o funcionamento do sistema. O método de diagnose de falhas utilizado, porém, não limita esse número e permite que novas árvores sejam construídas e adicionadas ao modelo obtido, para um maior refinamento dos resultados.

Durante a construção das árvores de falhas, não foram considerados equipamentos em redundância passiva, como as bombas de GNL (1B, 2B, 3B e 4B) e o segundo compressor. Isso ocorreu porque estes componentes operam apenas quando o principal se encontra em estado de falha e, ainda assim, seu funcionamento depende de acionamento manual feito pelo operador do navio, ou seja, não influenciam na leitura dos sensores do sistema.

Por medida de segurança e seguindo a recomendação de IMO (2005), o sistema em estudo apresenta, além dos componentes já citados, sensores de detecção de gás e de temperatura ao longo de todas as tubulações e ao redor dos tanques e operam em redundância ativa, a fim de que o menor vazamento de gás seja rapidamente detectado. Devido a isso, esse modo de falha que pode ser apresentado pelos componentes do sistema (como mostrado no FMEA desenvolvido) não foi considerado no desenvolvimento das árvores de falha. Isso

faz com que o método desenvolvido foque na diagnose das falhas que não podem ser identificadas por esse sistema exclusivo de detecção de gás, além de diminuir a complexidade das Redes Bayesianas que foram desenvolvidas no próximo passo.

A Figura 36 apresenta uma das árvores de falhas desenvolvidas, a FT "LI1 acima do esperado" quando do descarregamento dos tanques do navio. Todas as árvores de falhas encontram-se no Apêndice C.

Figura 36 - FT "Nível de GNL Acima do Esperado" para o sensor LI1, durante a descarga do tanque

Fonte: Própria

5.5. Redes Bayesianas

Após a construção das árvores de falhas para cada leitura dos sensores considerada, dá-se a conversão das FTs obtidas em Redes Bayesianas para a obtenção do modelo do sistema utilizado para a realização da diagnose de falhas.

5.5.1. Conversão de FTs em RBs

O processo de conversão foi apresentado na seção 3.3.3.8 deste trabalho. O software utilizado para o desenvolvimento das RBs é o Agena Risk (Agena Risk, 2014). A título de exemplo, a Figura 37 mostra a RB obtida a partir da FT apresentada na Figura 36.

Uma das grandes vantagens na utilização da técnica de Redes Bayesianas para diagnose de falhas é que ela permite unificar todas as árvores de falhas obtidas, o que permite que estas sejam analisadas simultaneamente.

Durante a construção das FTs, foi possível perceber que os componentes do sistema de Boil-off não influenciam nas leituras dos sensores do sistema de GNL e vice-versa, ou seja, não existe a necessidade de unir as Redes Bayesianas dos dois sistemas, já que se comportam como independentes. De fato, foram obtidas três Redes Bayesianas para representar o comportamento do sistema de carga e descarga: uma para o circuito de Boil-off; uma para o circuito de GNL durante o carregamento do navio; e um para o circuito de GNL durante o processo de descarga. As Figuras 38, 39 e 40 apresentam as redes obtidas. Os nós em azul representam os modos de falhas dos componentes e os nós em amarelo correspondem às leituras dos sensores.

Figura 37 - RB "Nível de GNL Acima do Esperado" para o sensor LI1, durante a descarga do tanque

Fonte: Própria

Figura 38 - RB para o sistema de Boil-off

Fonte: Própria

Figura 39 - RB do sistema de GNL para a descarga dos tanques

Fonte: Própria

Figura 40 - RB do sistema de GNL para o carregamento dos tanques

Fonte: Própria

5.5.2. Inserindo as Probabilidades a Priori

As probabilidades *a priori* das RBs apresentadas correspondem às probabilidades de falha dos componentes presentes nos nós raiz. Para a obtenção destas probabilidades foi considerada uma taxa de falhas constante, resultando em uma distribuição exponencial para a confiabilidade dos componentes. A Tabela 10 apresenta as taxas de falhas consideradas para cada componente. Estas foram retiradas dos bancos de dados OREDA (2002) e NPRD (1995). O cálculo da confiabilidade de cada componente se deu por:

$$R = e^{-\lambda t} \quad (20)$$

onde λ é a taxa de falha fornecida pelo banco de dados e t é o tempo de operação do sistema. Considerando que, durante um ano de operação do navio, os componentes em estudo operem por 576 horas (Silva, 2013), obtém-se a confiabilidade dos componentes, também apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Taxa de falha para os componentes em estudo

Equipamento	Modo de Falha	Taxa de Falha (x10⁻⁶)	Confiabilidade	Fonte
Compressor	Não Opera (NO)	20.54	0.98824	OREDA
Bomba	Não Opera (NO)	12.99	0.99255	OREDA
Tubulação	Bloqueio (BL)	0.0167	0.99999	NPRD
Válvula de Alívio de GNL	Falha Fechada (FF)	0.36	0.99979	OREDA
	Falha Aberta (FA)	0.36	0.99979	OREDA
Válvula de Alívio de Boil-off	Falha Fechada (FF)	0.28	0.99984	OREDA
	Falha Aberta (FA)	0.28	0.99984	OREDA
Válvula Borboleta de GNL	Falha Fechada (FF)	27.93	0.98404	OREDA
	Falha Aberta (FA)	27.93	0.98404	OREDA
Válvula Borboleta de Boil-off	Falha Fechada (FF)	2.73	0.99843	OREDA
	Falha Aberta (FA)	2.73	0.99843	OREDA
Válvula Globo de GNL	Falha Fechada (FF)	0.9	0.99948	OREDA
	Falha Aberta (FA)	0.9	0.99948	OREDA
Válvula de Retenção de GNL	Falha Fechada (FF)	11.24	0.99355	OREDA
Válvula de Retenção de Boil-off	Falha Fechada (FF)	12.9	0.99260	OREDA
Sensor de Nível	Não Opera (NO)	2.6	0.99850	NPRD
Sensor de Pressão de GNL	Não Opera (NO)	5.55	0.99681	OREDA
Sensor de Pressão de Boil-off	Não Opera (NO)	5.75	0.99669	OREDA
Sensor de Presença de Boil-off	Não Opera (NO)	8.44	0.99515	OREDA

5.5.3. Inserindo a Incerteza do Sensor

Para que a confiabilidade do sensor seja levada em consideração nos cálculos da RB, é necessário substituir, na CPT correspondente ao sensor, os valores de 1 e 0 (obtidos na conversão de FT para RB) pelos valores de confiabilidade e probabilidade de falha, respectivamente (Lampis, 2010). Assim, a possibilidade de o sensor falhar é levada em consideração na análise feita pela RB. A Tabela 11 mostra a CPT do nó "LI1 Acima do Esperado" após a conversão de FT e RB. Já a Tabela 12 mostra a mesma CPT após a inserção da confiabilidade do sensor

Tabela 11 - Exemplo de CPT de um sensor após a conversão de FT para RB

Falha no Sistema de Bombeio	Retorno de GNL pelo Sist de Alívio	Falha no Sistema de Distribuição	LI1 Acima do Esperado	LI1 Acima do Esperado
			Sim	Não
Sim	Sim	Sim	1	0
Sim	Sim	Não	1	0
Sim	Não	Sim	1	0
Sim	Não	Não	1	0
Não	Sim	Sim	1	0
Não	Sim	Não	1	0
Não	Não	Sim	1	0
Não	Não	Não	0	1

Tabela 12 - Exemplo de CPT de um sensor após a inserção de sua confiabilidade

Falha no Sistema de Bombeio	Retorno de GNL pelo Sist de Alívio	Falha no Sistema de Distribuição	LI1 Acima do Esperado	LI1 Acima do Esperado
			Sim	Não
Sim	Sim	Sim	0,9985	0,0015
Sim	Sim	Não	0,9985	0,0015
Sim	Não	Sim	0,9985	0,0015
Sim	Não	Não	0,9985	0,0015
Não	Sim	Sim	0,9985	0,0015
Não	Sim	Não	0,9985	0,0015
Não	Não	Sim	0,9985	0,0015
Não	Não	Não	0,0015	0,9985

5.6. Validação do Método

A validação do método dar-se-á através da inserção de informações sobre as leituras dos sensores presentes nas três Redes Bayesianas obtidas e, através das probabilidades *a posteriori* obtidas, analisar-se-á a coerência dos resultados obtidos em relação ao esperado em relação ao funcionamento do sistema. Esse processo de validação será feito com as três RBs, apresentadas nas Figuras 38, 39 e 40.

5.6.1. Análise da RB do sistema de *Boil-off*

A Figura 41 mostra as probabilidades a priori dos modos de falha dos componentes do sistema e a probabilidade de que uma das leituras dos sensores aconteça. Percebe-se que tais probabilidades são, como esperado, baixas para o tempo de observação do sistema.

A Figura 42 mostra a probabilidade a posteriori dos componentes do sistema quando nenhum sensor indica uma leitura fora do esperado. A probabilidade de falha dos componentes, portanto, tende a zero.

A Figura 43 apresenta probabilidade a posteriori dos componentes do sistema quando o sensor DG1 detecta a presença de gás, enquanto os outros sensores não apresentam leituras inesperadas. Isso faz com que as probabilidades das válvulas CR100 e CR101 falharem abertas aumentem para 49,925%. Considerando que a pressão na tubulação de Boil-off não chegou a 250 mbar (pressão limite para a abertura das válvulas de alívio), o motivo mais provável pela detecção de gás por DG1 passa a ser pelo menos uma das duas falhas apresentadas pela RB.

Já na Figura 44, não só DG1 detectou a presença de gás como PG1 indica pressão limite. Agora, as probabilidades de CR100 e CR101 falharem abertas, como no caso anterior, são mínimas, já que o funcionamento correto destas válvulas é permitir a passagem de gás quando a pressão limite é atingida. A RB indica que o mais provável responsável pela leitura dos sensores é a válvula

CG100, que falha fechada. Quando CG100 não permite a passagem de gás pela tubulação de Boil-off, a pressão dentro do tanque 1 inevitavelmente aumenta e, ao atingir a pressão limite, tende a acionar os dois sensores (DG1 e PG1).

Por fim, na Figura 45, os sensores PG1, PG2, PG3 e PG4 indicam que a pressão limite foi atingida nos quatro tanques, enquanto os sensores DG1, DG2, DG3 e DG4 indicam presença de gás liberado pelas respectivas válvulas de alívio. A RB fornece como prováveis causadores destas leituras as válvulas CG704 e CG903, cujas probabilidades de falharem fechadas passam a ser, ambas, de 49,881%. Neste caso em particular, como o mesmo efeito foi percebido em todos os tanques de armazenamento, fica evidente que o mais provável causador das leituras dos sensores seja algum componente cuja falha consiga interferir em todas elas ao mesmo tempo. Vale ressaltar que as probabilidades de falhas de CG704 e CG903 são idênticas porque, além de interferirem da mesma maneira na leitura dos sensores, possuem a mesma confiabilidade. O mesmo vale para o caso da Figura 43.

É possível perceber que a RB obtida fornece um modelo que consegue representar o comportamento do circuito de Boil-off, de modo a contribuir para a diagnose de falhas do sistema.

Figura 41 - RB do sistema de Boil-off: Probabilidades a priori

Fonte: Própria

Figura 42 - RB do sistema de Boil-off: Nenhuma leitura inesperada

Fonte: Própria

Figura 43 - RB do sistema de Boil-off: DG1 com leitura inesperada

Fonte: Própria

Figura 44 - RB do sistema de Boil-off: DG1 e PG1 com leituras inesperadas

Fonte: Própria

Figura 45 - RB do sistema de Boil-off: DG1, DG2, DG3, DG4, PG1, PG2, PG3 e PG4 com leituras inesperadas

Fonte: Própria

5.6.2. Análise da RB do Sistema de GNL (Carga)

A análise feita na Rede Bayesiana obtida para o sistema de Boil-off pode ser estendida às RBs do sistema de GNL. A Figura 46 mostra as probabilidades a priori, ou confiabilidades, dos modos de falha dos componentes do sistema de GNL durante a carga dos tanques do navio e a probabilidade de que uma das leituras dos sensores aconteça. Percebe-se que tais probabilidades são, como esperado, baixas para o tempo de observação do sistema.

A Figura 47 mostra a probabilidade a posteriori dos componentes do sistema quando nenhum sensor indica uma leitura fora do esperado. A probabilidade de falha dos componentes, portanto, tende a zero.

A Figura 48 apresenta probabilidades a posteriori dos componentes do sistema quando o sensor LI1 indica um nível de GNL no tanque 1 abaixo do esperado e o sensor PL1 indica uma pressão na entrada do primeiro tanque abaixo da esperada. Os outros sensores não indicam leituras inesperadas. Isso faz com que a probabilidade da válvula CL107 falhar fechada aumente para 99,368%. A válvula CL107 é, de fato, a mais provável responsável por estas leituras, já que, se falhar fechada, ela evita que GNL seja abastecido no tanque 1 ao mesmo tempo que impede que PL1 indique uma pressão adequada na entrada deste tanque.

Fonte: Própria

Figura 47 - RB do sistema de GNL (Carga): Nenhuma leitura inesperada

Fonte: Própria

Figura 48 - RB do sistema de GNL (Carga): LI1 e PL1 com leituras inesperadas

Fonte: Própria

5.6.3. Análise da RB do Sistema de GNL (Descarga)

A Figura 49 mostra as probabilidades a priori, ou confiabilidades, dos modos de falha dos componentes do sistema de GNL durante a descarga dos tanques do navio e a probabilidade de que uma das leituras dos sensores aconteça. Percebe-se que tais probabilidades são, como esperado, baixas para o tempo de observação do sistema.

A Figura 50 mostra a probabilidade a posteriori dos componentes do sistema quando nenhum sensor indica uma leitura fora do esperado. A probabilidade de falha dos componentes, portanto, tende a zero.

A Figura 51 apresenta probabilidades a posteriori dos componentes do sistema quando o sensor LI1 indica um nível de GNL no tanque 1 acima do esperado e o sensor PL1 indica uma pressão na entrada do primeiro tanque abaixo da esperada. Os outros sensores não indicam leituras inesperadas. Isso faz com que as probabilidades da válvula CL100 falhar aberta e da válvula CL101 falhar fechada aumentem para 35,243%. Estas válvulas são, de fato, as mais prováveis responsáveis por estas leituras, já que, se uma delas falhar, isto evitaria que GNL fosse retirado do tanque 1 ao mesmo tempo que impede que PL1 indique uma pressão adequada na saída deste tanque.

Analisando a Figura 51, é possível perceber que a RB não consegue identificar apenas um componente como responsável pelas leituras dos sensores, já que dois deles (CL100 e CL101) tem o mesmo efeito sobre os sensores quando em estado de falha. Este problema pode ser resolvido inserindo mais sensores no sistema, de modo que os modos de falha destas válvulas tenham um efeito diferente sobre as leituras deles.

A análise feita pela RB em relação ao sistema, porém, não se limita à inserção de evidências dadas pelas leituras dos sensores. Se a equipe de manutenção do navio fizer uma análise em uma das válvulas indicadas pela Figura 51 e identificar que, por exemplo, CL100 não falhou aberta, é possível

inserir esta evidência na RB e continuar a análise do sistema. A Figura 52 apresenta a situação descrita e indica que, se CL100 não estiver em estado de falha, a mais provável responsável pelas leituras dos sensores é a válvula CL101, com probabilidade de 53,555% de ter falhado fechada.

Figura 49 - RB do sistema de GNL (Descarga): Probabilidades a priori

Fonte: Própria

Figura 50 - RB do sistema de GNL (Descarga): Nenhuma leitura inesperada

Fonte: Própria

Figura 51 - RB do sistema de GNL (Descarga): LI1 e PL1 com leituras inesperadas

Fonte: Própria

Figura 52 - RB do sistema de GNL (Descarga): Inserindo evidência sobre componente

Fonte: Própria

6 CONCLUSÕES

6.1. Conclusões Parciais

Este trabalho desenvolveu um método para a criação de um sistema de diagnose de falhas através do uso de Redes Bayesianas. As técnicas de Árvore Funcional (AF), Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) e Árvores de Falhas (FT) foram utilizadas como suporte à construção das redes. O método está sendo aplicado no sistema de carga e descarga de GNL de um navio metaneiro.

O método fornece uma abordagem bem estruturada para a construção das Redes Bayesianas utilizadas na diagnose de falhas do sistema. O uso das técnicas AF, FMEA e FTA foram fundamentais para a completa compreensão do funcionamento do sistema e, conseqüentemente, para sua modelagem.

A RB fornece a probabilidade de cada componente do sistema ser o responsável por uma leitura do sensor fora do esperado. Aquele que tiver maior probabilidade de falha, neste caso, será o mais provável responsável. Tal análise, diferentemente da realizada através de Árvores de Falha, não provê falhas múltiplas como resposta, embora não as exclua.

Trabalhando-se com o sistema de carga e descarga de GNL, foi possível perceber que os sensores nele presentes foram implementados a fim de aumentar a segurança do sistema, ou seja, o sensoriamento é realizado de modo a evitar que situações de risco sejam evitadas, principalmente em relação ao vazamento de GNL ou Boil-off. Para a realização de uma diagnose de falhas, no entanto, o sistema de monitoramento poderia ser melhorado, por exemplo, com a adição de sensores de fluxo ao longo dos três tipos de tubulação presentes: de GNL, de Boil-off e de Alívio.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

O método para diagnose de falhas proposto neste trabalho foi aplicado no sistema de carga e descarga de GNL de um navio metaneiro, mas pode ser estendido a todos os outros sistemas do navio como, por exemplo, o sistema de inertização das tubulações.

Ademais, a diagnose de falhas realizada pelo método proposto não considera efeitos dinâmicos no sistema. Nela, admitiu-se que os sensores proviam apenas informações simples e estáticas, como "Nível de GNL Acima do Esperado". No entanto, o comportamento dinâmico dos sensores, como uma variação rápida de temperatura ou uma queda brusca de pressão, pode fornecer informações importantes para a diagnose de falhas. Sugere-se, portanto, considerar a utilização de Rede Bayesiana em conjunto com as outras técnicas utilizadas para a resolução desta deficiência do método proposto.

Apesar de a Rede Bayesiana ter se mostrado eficiente para resolução de problemas de diagnose de falhas, sua representação visual do sistema em estudo é de difícil compreensão, especialmente quando o sistema é muito complexo (vide Figuras 38 a 40). Uma possível solução para este problema é a utilização de Redes Bayesianas Orientadas a Objetos (RBOO). A RBOO permite que, dentro de uma rede, sejam representadas "sub-redes" através de nós de instância (do inglês "instance nodes"), o que facilitaria a inserção das redes obtidas a partir de cada árvore de falhas. Esta técnica só não foi aplicada nesta pesquisa por uma limitação do software utilizado, mas sua utilização é recomendada.

Por fim, com o objetivo de testar a adaptabilidade do método, sugere-se aplicá-lo em sistemas diferentes do estudado, avaliando sua eficácia em diferentes situações.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABS, American Bureau of Shipping. **Guidance Notes on Surveys During Construction of Membrane Tank LNG Carriers**. American Bureau of Shipping, Houston, 2008.

AGENA RISK. **Bayesian Network and Simulation Software for Risk Analysis and Decision Support**. Disponível em: <http://www.agenarisk.com/>
Acessado em: 25/01/2014

ANDREWS, J., **The use of not logic in fault tree analysis**, Quality and Reliability Engineering International, vol. 17, nº 3, pp.143-150, 2001.

ANDREWS, J. **Fault Tree based approach for system fault diagnostics**. 23rd International System Safety Conference, San Diego, 2005.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília, 2008.

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **O gás natural liquefeito no Brasil**. Boletim Mensal do Gás Natural. Superintendência de Comercialização e Movimentação de Petróleo, seus Derivados e Gás Natural – SCM. Nº 14. Rio de Janeiro, 2010.

BARKAI, J., **Automatic Generation of a Diagnostic Expert System from Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Information**, SAE Technical Paper, doi:10.4271/1999-01-0060, 1999.

BOBBIO, A.; PORTINALE, L.; MINICHINO, M.; CIANCAMERLA, E. **Improving the Analysis of Dependable Systems by Mapping Fault Trees into Bayesian Networks**. Reliability Engineering and System Safety 71, p.p. 249-260, 2001.

CASE, K., NOR, A., TEOH, P. C., **A Diagnostic Service Tool Using FMEA**. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 23 (7), pp. 640-654, 2010.

CARAZAS, F. J. G. **Análise de Disponibilidade de Turbinas a Gás Empregadas em Usinas Termelétricas a Ciclo Combinado**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

CARAZAS, F. J. G. **Decisões Baseadas em Risco – Método Aplicado na Indústria de Geração de Energia Elétrica para a Seleção de Equipamentos Críticos e Políticas de Manutenção**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

CONTINI, S., COJAZZI, G. G. M., RENDA, G., **On the use of non-coherent fault trees in safety and security studies**, Reliability Engineering and System Safety, vol. 93, nº 12, pp. 1886-1895, Dezembro de 2008.

COZMAN, F. G., **An Introduction to the Theory of Sets of Probability Distributions**, retirado de <http://sites.poli.usp.br/p/fabio.cozman/didatico/Probs/support.pdf> Acessado em 15/05/2014. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2009.

DOE, Department of Energy, **Liquefied Natural Gas: Understanding the Basic Facts**. DOE/FE-0489, 2005.

ENAGAS. Empresa Nacional del Gas. **Procedimiento de descarga segura de buques**. Área: Dirección de Infraestructuras. PF-003-DI 07/2006, 15 pp., 2006.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2014: Ano Base 2013**. Rio de Janeiro, 2014.

FELIX, E. P. **Análise de Confiabilidade de Sistemas Eletrônicos Baseada em Ensaio Acelerados de Vida**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

HAMADA, M. S.; WILSON, A. G.; REESE, C. S.; MARTZ, H. F. **Bayesian Reliability**. Springer Science Business Media. New York, 2008.

HARRIS, F. S. **Safety Features on LNG Ships**. Cryogenics, Volume 33, pp 772-777, 1993.

HIDALGO, E. M. P. **Modelo para Diagnose de Falhas em Regulador de Velocidade de Turbinas Hidráulicas**. Tese de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

HURDLE, E. E.; BARLETT, L. M.; ANDREWS, J. D. **System Fault Diagnostics Using Fault Tree Analysis**. Proceedings of the 16th Advances in Reliability Technology Symposium (ARTS), pp. 203-222. Loughborough, 2005.

IEA, International Energy Agency, **World Energy Investment Outlook: 2003 Insights**, Paris, 2003

IEC, International Electrotechnical Commission, **Risk Management - Risk Assessment Techniques**, Número de Referência: IEC/FDIS 31010:2009(E), 2009.

IMO, International Maritime Organization. **International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code)**. IMO Publications, 2005.

ISERMANN, R. **Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance**. Editora Springer-Verlag, 2006.

JENSEN, F. V., NIELSEN, T. D., **Bayesian Networks and Decision Graphs**, Segunda Edição, Editora Springer, New York, 2007.

KECECIOGLU, D. **Reliability Engineering Handbook**. Volume 2. Editora Prentice Hall. Pennsylvania, 1991.

LAMB, T. **Ship Design and Construction**. Volumes 1 e 2. Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Jersey City, 2004.

LAMPIS, M.; ANDREWS, J. D.; **Bayesian Belief Networks for System Fault Diagnostics**. Quality and Reliability Engineering International. pp 409-426. Wiley InterScience. 2008.

LAMPIS, M. **Application of Bayesian Belief Networks to System Fault Diagnostics**. Tese de Doutorado, Loughborough University. Loughborough, 2010.

LEE, W. S., GROSH, D. L., TILLMAN, F. A., LIE, C. H., **Fault Tree Analysis, Methods and Applications**, Transactions on Reliability, IEEE Press, Vol. R-34, n° 3, 1985.

LEITCH, R. **Reliability Analysis for Engineers**. Primeira Edição, Editora Oxford Press, Grã-Bretanha, 1995

LEMES, D. V. **Proposta de Método de Análise de Confiabilidade de Sistemas Eletrônicos Empregando Dados de Retorno em Garantia**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

LEWIS, E. E. **Introduction to Reliability Engineering**. Segunda Edição. Editora John Wiley & Sons. Nova York, 1987.

MANOEL, C. O. **Aspectos Regulatórios e Modelos Contratuais Aplicáveis ao Mercado de Distribuição de Gás Natural a Granel (Gás Natural Comprimido – GNC e Gás Natural Liquefeito – GNL) no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica/Faculdade de Economia e Administração/Instituto de Eletrotécnica e Energia/Instituto de Física). São Paulo, 2006.

MATURANA, M. C., **Aplicação de Redes Bayesianas na Análise de Contribuição do Erro Humano em Acidentes de Colisão**. Dissertação para obtenção do título de mestre. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MECHRAOUI, A., MEDJAHHER, K., ZERHOUNI, N., **Bayesian Based Fault Diagnosis: Application to an Electrical Motor**, 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control, Seoul, 2008.

MELANI, A. H. A. **Desenvolvimento de um sistema de monitoração e diagnose de falhas para a etapa de moagem de cana de açúcar em destilarias de etanol**. 19º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

MODARRES, M.; KAMINSKIY, M.; KRIVTSOV, V. **Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide**. Segunda Edição. Editora CRC Press. Flórida, 2010.

NATURALGAS. **Natural Gas – From Wellhead to Burner Tip**. Disponível em: [www. http://naturalgas.org/naturalgas/](http://naturalgas.org/naturalgas/) Acessado em: 20/10/2014.

NEAPOLITAN, R. E. **Learning Bayesian Networks**. Editora Prentice Hall. New Jersey, 2004.

NORVIG, P.; RUSSELL, S. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. Terceira Edição. Editora Prentice Hall. New Jersey, 2010.

NPRD, **Noneletronic Parts Reliability Data**, Reliability Analysis Center - RAC, Griffiss AFB, NY, USA, 1995

O'CONNOR, P. D. T.; KLEYNER, A. **Practical Reliability Engineering**. Quinta Edição. Editora John Wiley & Sons. Nova York, 2012.

OREDA, **Offshore Reliability Data Handbook**, DET NORSKE VERITAS - DNV, 4^a Edição, 2002.

PAPADOPOULOS, Y., MCDERMID, J., **Automated Safety Monitoring: A Review and Classification of Methods**, International Journal of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, 4:14-32, Outubro de 2001.

PAPADOPOULOS, Y., SHARVIA, S., **Non-coherent Modelling in Compositional Fault Tree Analysis**. Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, 2008.

PEARL, J., **Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference**, Editora Morgan Kaufman, California, 1988.

PETROBRAS NBR 2784, **Confiabilidade e Análise de Riscos**, Rio de Janeiro, 2005.

PETROBRAS. **Entra em Operação o Maior Navio Regaseificador do Mundo**. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/entra-em-operacao-comercial-o-maior-navio-regaseificador-do-mundo.htm>, acessado em 20 de setembro de 2014.

PITBLADO, R. M., WOODWARD, J. L., **Highlights of LNG Risk Technology**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 24, pp. 827-836, 2011.

PRICE, C., TAYLOR, N. **Multiple Fault Diagnosis from FMEA**, Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence, pp. 1052-1057, 1997.

SAGGAS, Planta de Regasificación de Sagunto, S. A., **Reception of Natural Gas**, Disponível em: <http://www.saggas.com/en/proceso-de-regasificacion/recepcion-de-gas-natural> Acessado em: 09/12/2014

SANDIA. **Guidance on Risk Analysis and Safety Implications of a Large Liquefied Natural Gas (LNG) Spill Over Water**. SAND2004-6258, 2004.

SILVA, D. W. R. **Análise de Falhas e Suas Consequências na Operação de Navios Transportadores de Gás Natural Liquefeito (GNL)**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

SCHLEDER, A. M. **Aplicação de Redes Bayesianas para a Análise de Confiabilidade do Sistema de Regaseificação de uma Unidade Tipo FSRU**.

Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

SMITH, A. M., HINCHCLIFE, G. R. **RCM gateway to world class maintenance**. Editora Butterworth-Heinemann, Oxford, 2004.

SOUZA, G. F. M. **Análise de Confiabilidade Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos**. Apostila da disciplina de pós-graduação “PMR5201 – Análise de Confiabilidade Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos”. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

SPEIGHT, J. G., **Handbook of Petroleum Product Analysis**, Wiley, Hoboken, NJ, 2002.

SUNDARARAJAN, C. **Guide to Reliability Engineering: Data, Analysis, Application, Implementation and Management**. Editora Van Nostrand Reinhold. Nova York, 1991.

VENKATASUBRAMANIAN, V., RENGASWAMY, R., YIN, K., KAVURI, S., **A review of process fault detection and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods**, Computers and Chemical Engineering, vol. 27, no. 3, pp. 293-311, 2003.

XU, B. G., **Intelligent fault inference for rotating flexible rotors using Bayesian belief network**, Experts Systems with Applications International Journal, 39, pp. 816-822, 2012.

APÊNDICE A - DESCRIÇÃO FUNCIONAL

A descrição funcional, que complementa a análise feita pela Árvore Funcional apresentada na figura 36, é exposta a seguir.

1. **Sistema de Carga e Descarga do Navio:** Transferir GNL para dentro ou para fora dos tanques do navio e transferir *Boil-off* para fora dos tanques do navio.

1.1. **Sistema de GNL:** Transferir GNL dos tanques de armazenagem para o terminal ou vice-e-versa.

1.1.1. **Sistema de Alívio de Pressão:** Limitar a pressão de GNL em sua tubulação.

1.1.1.1. **Válvulas de Alívio:** Limitar a pressão de GNL transferindo-o para a tubulação de alívio.

1.1.1.1.1. CR700: Limitar a pressão de GNL na tubulação principal.

1.1.1.1.2. CR011: Limitar a pressão de GNL na tubulação próxima ao manifold.

1.1.1.1.3. CR013: Limitar a pressão de GNL na tubulação próxima ao manifold.

1.1.1.1.4. CR021: Limitar a pressão de GNL na tubulação próxima ao manifold.

1.1.1.1.5. CR023: Limitar a pressão de GNL na tubulação próxima ao manifold.

1.1.1.1.6. CR031: Limitar a pressão de GNL na tubulação próxima ao manifold.

1.1.1.1.7. CR033: Limitar a pressão de GNL na tubulação próxima ao manifold.

1.1.1.1.8. CR103: Limitar a pressão de GNL na tubulação próxima ao tanque 1.

1.1.1.1.9. CR203: Limitar a pressão de GNL na tubulação próxima ao tanque 2.

1.1.1.1.10. CR303: Limitar a pressão de GNL na tubulação próxima ao tanque 3.

1.1.1.1.11. CR403: Limitar a pressão de GNL na tubulação próxima ao tanque 4.

1.1.1.2. **Tubulação de Alívio:** Retornar GNL aos tanques de armazenagem.

1.1.2. **Sistema de Bombeio:** Descarregar o GNL dos tanques de armazenamento do navio.

1.1.2.1. **Sistema de Bombeio Principal:** Descarregar o GNL dos tanques de armazenamento do navio.

1.1.2.1.1. **Bombas:** Transfere energia mecânica para o GNL visando seu deslocamento.

1.1.2.1.1.1. Bomba 1A: Descarregar Tanque 1.

1.1.2.1.1.2. Bomba 2A: Descarregar Tanque 2.

1.1.2.1.1.3. Bomba 3A: Descarregar Tanque 3.

1.1.2.1.1.4. Bomba 4A: Descarregar Tanque 4.

1.1.2.1.2. **Válvulas de Retenção:** Permite a passagem de fluido em apenas uma direção.

1.1.2.1.2.1. CL105: Permite a passagem de fluido da Bomba 1A em apenas uma direção.

1.1.2.1.2.2. CL205: Permite a passagem de fluido da Bomba 2A em apenas uma direção.

1.1.2.1.2.3. CL305: Permite a passagem de fluido da Bomba 3A em apenas uma direção.

1.1.2.1.2.4. CL405: Permite a passagem de fluido da Bomba 4A em apenas uma direção.

1.1.2.2. **Sistema de Bombeio Reserva:** Descarregar o GNL dos tanques de armazenamento do navio se o Sistema de Bombeio Principal estiver em estado de falha.

1.1.2.2.1. **Bombas:** Transfere energia mecânica para o GNL visando seu deslocamento.

- 1.1.2.2.1.1. Bomba 1B: Descarregar Tanque 1.
- 1.1.2.2.1.2. Bomba 2B: Descarregar Tanque 2.
- 1.1.2.2.1.3. Bomba 3B: Descarregar Tanque 3.
- 1.1.2.2.1.4. Bomba 4B: Descarregar Tanque 4.
- 1.1.2.2.2. **Válvulas de Retenção:** Permite a passagem de fluido em apenas uma direção.
 - 1.1.2.2.2.1. CL106: Permite a passagem de fluido da Bomba 1B em apenas uma direção.
 - 1.1.2.2.2.2. CL206: Permite a passagem de fluido da Bomba 2B em apenas uma direção.
 - 1.1.2.2.2.3. CL306: Permite a passagem de fluido da Bomba 3B em apenas uma direção.
 - 1.1.2.2.2.4. CL406: Permite a passagem de fluido da Bomba 4B em apenas uma direção.
- 1.1.3. **Sistema de Distribuição:** Encaminhar o GNL dos tanques ao manifold ou do manifold aos tanques.
 - 1.1.3.1. **Tubulações de GNL:** Conduzir o GNL
 - 1.1.3.2. **Válvulas de Bloqueio:** Permitem ou interrompem a passagem de GNL
 - 1.1.3.2.1. CL011: Permitir ou interromper a passagem de GNL no manifold.
 - 1.1.3.2.2. CL021: Permitir ou interromper a passagem de GNL no manifold.
 - 1.1.3.2.3. CL031: Permitir ou interromper a passagem de GNL no manifold.
 - 1.1.3.3. **Válvulas de Controle de Fluxo:** Controlar o fluxo de GNL
 - 1.1.3.3.1. CL100: Controlar o fluxo de GNL que entra no tanque 1.
 - 1.1.3.3.2. CL101: Controlar o fluxo de GNL que sai da Bomba 1A.

- 1.1.3.3.3. CL102: Controlar o fluxo de GNL que sai da Bomba 1B.
- 1.1.3.3.4. CL107: Controlar o fluxo de GNL que sai do tanque 1.
- 1.1.3.3.5. CL200: Controlar o fluxo de GNL que entra no tanque 2.
- 1.1.3.3.6. CL201: Controlar o fluxo de GNL que sai da Bomba 2A.
- 1.1.3.3.7. CL202: Controlar o fluxo de GNL que sai da Bomba 2B.
- 1.1.3.3.8. CL207: Controlar o fluxo de GNL que sai do tanque 2.
- 1.1.3.3.9. CL300: Controlar o fluxo de GNL que entra no tanque 3.
- 1.1.3.3.10. CL301: Controlar o fluxo de GNL que sai da Bomba 3A.
- 1.1.3.3.11. CL302: Controlar o fluxo de GNL que sai da Bomba 3B.
- 1.1.3.3.12. CL307: Controlar o fluxo de GNL que sai do tanque 3.
- 1.1.3.3.13. CL400: Controlar o fluxo de GNL que entra no tanque 4.
- 1.1.3.3.14. CL401: Controlar o fluxo de GNL que sai da Bomba 4A.
- 1.1.3.3.15. CL402: Controlar o fluxo de GNL que sai da Bomba 4B.
- 1.1.3.3.16. CL407: Controlar o fluxo de GNL que sai do tanque 4.
- 1.1.3.3.17. CL013: Controlar o fluxo de GNL que passa pelo manifold.

1.1.3.3.18. CL023: Controlar o fluxo de GNL que passa pelo manifold.

1.1.3.3.19. CL033: Controlar o fluxo de GNL que passa pelo manifold.

1.1.4. **Sistema de Armazenagem:** estoca GNL

1.1.4.1. **Tanque 1:** armazena GNL

1.1.4.2. **Tanque 2:** armazena GNL

1.1.4.3. **Tanque 3:** armazena GNL

1.1.4.4. **Tanque 4:** armazena GNL

1.1.5. **Sistema de Monitoramento:** Monitorar as condições de operação do sistema de GNL

1.1.5.1. **Sensor de Nível:** Aferir o nível ou quantidade de GNL dentro dos tanques de armazenamento.

1.1.5.1.1. LI1: Aferir o nível de GNL no tanque 1.

1.1.5.1.2. LI2: Aferir o nível de GNL no tanque 2.

1.1.5.1.3. LI3: Aferir o nível de GNL no tanque 3.

1.1.5.1.4. LI4: Aferir o nível de GNL no tanque 4.

1.1.5.2. **Sensor de Pressão:** Aferir a pressão do GNL na saída dos tanques de armazenagem.

1.1.5.2.1. PL1: Aferir a pressão do GNL na saída do tanque 1.

1.1.5.2.2. PL2: Aferir a pressão do GNL na saída do tanque 2.

1.1.5.2.3. PL3: Aferir a pressão do GNL na saída do tanque 3.

1.1.5.2.4. PL4: Aferir a pressão do GNL na saída do tanque 4.

1.2. **Sistema de Boil-off:** Transferir *Boil-off* dos tanques do navio para o terminal.

1.2.1. **Sistema de Distribuição:** Encaminhar o *Boil-off* dos tanques ao manifold.

1.2.1.1. **Tubulações de Boil-off:** Conduzir o *Boil-off*

1.2.1.2. **Válvulas de Controle de Fluxo:** Controlar o fluxo de *Boil-off*.

1.2.1.2.1. CG900: Controlar o fluxo de *Boil-off* na saída dos Compressores..

1.2.1.3. **Válvulas de Bloqueio:** Permitir ou interromper a passagem de *Boil-off*

1.2.1.3.1. CG100: Permitir ou interromper a passagem de *Boil-off* do tanque 1.

1.2.1.3.2. CG200: Permitir ou interromper a passagem de *Boil-off* do tanque 2.

1.2.1.3.3. CG300: Permitir ou interromper a passagem de *Boil-off* do tanque 3.

1.2.1.3.4. CG400: Permitir ou interromper a passagem de *Boil-off* do tanque 4.

1.2.1.3.5. CG704: Permitir ou interromper a passagem de *Boil-off* de todos os tanques.

1.2.1.3.6. CG071: Permitir ou interromper a passagem de *Boil-off* para o terminal.

1.2.2. **Sistema de Compressão:** Aumentar a Pressão de *Boil-off* para enviá-lo para o termina.

1.2.2.1. **Sistema de Compressão Principal:** Aumentar a Pressão de *Boil-off*.

1.2.2.1.1. Compressor 1: Aumentar a pressão do *Boil-off*.

1.2.2.1.2. Válvulas: Controlam a passagem de *Boil-off* para o Compressor 1

1.2.2.1.2.1. CG903: Permitir ou interromper a passagem de *Boil-off* para o Compressor 1.

1.2.2.1.2.2. CG907: Controlar a pressão de *Boil-off* do Compressor 1.

1.2.2.1.2.3. CG911: Permitir a passagem de *Boil-off* em apenas uma direção.

1.2.2.1.2.4. CG915: Permitir ou interromper a passagem de *Boil-off* na saída do Compressor 1.

1.2.2.2. **Sistema de Compressão Reserva:** Aumentar a Pressão de Boil-off se o Sistema de Compressão Reserva estiver em estado de falha

1.2.2.2.1. Compressor 2: Aumentar a pressão do Boil-off.

1.2.2.2.2. Válvulas: Controlam a passagem de Boil-off para o Compressor 2.

1.2.2.2.2.1. CG904: Permitir ou interromper a passagem de *Boil-off* para o Compressor 2.

1.2.2.2.2.2. CG908: Controlar a pressão de Boil-off do Compressor 2.

1.2.2.2.2.3. CG912: Permitir a passagem de Boil-off em apenas uma direção.

1.2.2.2.2.4. CG916: Permitir ou interromper a passagem de Boil-off na saída do Compressor 2.

1.2.3. **Sistema de Monitoramento:** Monitorar as condições de operação do sistema de *Boil-off*.

1.2.3.1. **Sensores de Pressão:** Aferir a pressão de Boil-off ao longo do Sistema de Boil-off.

1.2.3.1.1. PG1: Aferir a pressão de Boil-off no tanque 1.

1.2.3.1.2. PG2: Aferir a pressão de Boil-off no tanque 2.

1.2.3.1.3. PG3: Aferir a pressão de Boil-off no tanque 3.

1.2.3.1.4. PG4: Aferir a pressão de Boil-off no tanque 4.

1.2.3.1.5. PG5: Aferir a pressão de Boil-off na entrada do Compressor 1.

1.2.3.1.6. PG6: Aferir a pressão de Boil-off na saída do Compressor 1.

1.2.3.1.7. PG7: Aferir a pressão de Boil-off na entrada do Compressor 2.

1.2.3.1.8. PG8: Aferir a pressão de Boil-off na saída do Compressor 2.

1.2.3.1.9. PG9: Aferir a pressão de Boil-off próximo ao manifold.

1.2.3.2. **Sensores de Presença de Gás:** Aferir a presença de *Boil-off* na saída das válvulas de alívio de *Boil-off*.

1.2.3.2.1. DG1: Aferir a presença de *Boil-off* na saída das válvulas de alívio do tanque 1.

1.2.3.2.2. DG2: Aferir a presença de *Boil-off* na saída das válvulas de alívio do tanque 2.

1.2.3.2.3. DG3: Aferir a presença de *Boil-off* na saída das válvulas de alívio do tanque 3.

1.2.3.2.4. DG4: Aferir a presença de *Boil-off* na saída das válvulas de alívio do tanque 4.

1.2.4. **Sistema de Alívio de Pressão:** Limitar a pressão de *Boil-off* nos tanques de armazenagem e em sua tubulação.

1.2.4.1. CR100: Limitar a pressão de *Boil-off* no tanque 1.

1.2.4.2. CR101: Limitar a pressão de *Boil-off* no tanque 1.

1.2.4.3. CR200: Limitar a pressão de *Boil-off* no tanque 2.

1.2.4.4. CR201: Limitar a pressão de *Boil-off* no tanque 2.

1.2.4.5. CR300: Limitar a pressão de *Boil-off* no tanque 3.

1.2.4.6. CR301: Limitar a pressão de *Boil-off* no tanque 3.

1.2.4.7. CR400: Limitar a pressão de *Boil-off* no tanque 4.

1.2.4.8. CR401: Limitar a pressão de *Boil-off* no tanque 4.

APÊNDICE B - ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHA

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Compressor (Compressores 1 e 2)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Compressor (Compressores 1 e 2)	Aumentar a pressão do Boil-off	Não opera	1) falha no motor do compressor 2) quebra de elementos mecânicos 3) falha no circuito elétrico	1) Não há fluxo de Boil-off 2) Aumento de pressão na tubulação de Boil-off 3) Sistema de Carga e Descarga de GNL opera em estado de falha
		Vazamento externo	1) desgaste das vedações 2) dilatação/contração imprópria de componentes mecânicos 3) presença de trincas na estrutura	1) Vazamento de Boil-off 2) Possível queda de pressão na saída do Compressor 3) Riscos inerentes ao vazamento de Boil-off 4) Sistema de Carga e Descarga de GNL opera em estado de falha

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Bomba de GNL (Bombas 1A, 1B, 2A, 2B, 3A, 3B, 4A, 4B)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo(s) de Falha Potencial(is)	Causa(s) da falha	Efeito(s) Potencial(is) da Falha
Bomba de GNL (Bombas 1A, 1B, 2A, 2B, 3A, 3B, 4A, 4B)	Transfere energia mecânica para o GNL visando o descarregamento do tanque	Vazão anormal ou instável	1) cavitação 2) falha dos mancais da bomba 3) vazamento interno excessivo devido a contração/dilatação imprevistas dos componentes da bomba 4) falha no motor da bomba 5) linha de sucção obstruída	1) vazão de GNL abaixo do desejado no respectivo tanque, tempo de descarga aumenta 2) Possível queda de pressão na saída da bomba 3) Sistema de Carga e Descarga opera, mas com falha no Sistema de Bombeio
		Vazamento externo	1) Desgaste irregular da vedação 2) contração/dilatação imprevistas dos componentes da bomba	1) vazão de GNL abaixo do desejado no respectivo tanque, tempo de descarga aumenta 2) Possível queda de pressão na saída da bomba 3) Sistema de Carga e Descarga opera, mas com falha no Sistema de Bombeio
		Não há vazão	1) Desgaste irregular do estator 2) Eixo desalinhado 3) falha nos rolamentos 4) falha no motor da bomba 5) linha de sucção obstruída	1) Não há vazão de GNL 2) Sem pressão na saída da bomba 3) Sistema de Carga e Descarga em estado de falha

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Sensores de Nível de GNL(LI1, LI2, LI3, LI4)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Sensores de Nível de GNL(LI1, LI2, LI3, LI4)	Aferir o nível/quantidade de GNL em cada tanque	Sensor não operacional	1) falha no sensor 2) falha no registrador/ condicionador de sinais 3) falha nos contatos elétricos da fiação do sensor	1) perda de indicação do nível de GNL no respectivo tanque 2) falha no monitoramento das condições do GNL dentro do respectivo tanque 3) Sistema de Carga e Descarga operando normalmente, mas com dificuldade em tomar ações preventivas devido a falha do sensor.
		Operação intermitente	1) falha no sensor 2) falha no registrador/ condicionador de sinais 3) falha nos contatos elétricos da fiação do sensor	1) perda momentânea de indicação do nível do GNL no respectivo tanque 2) falha momentânea no monitoramento das condições do GNL dentro do respectivo tanque 3) Sistema de Carga e Descarga operando normalmente, mas com dificuldade momentânea em tomar ações preventivas devido a falha do sensor.

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Sensor de Pressão de GNL (PL1, PL2, PL3, PL 4)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Sensor de Pressão de GNL (PL1, PL2, PL3, PL 4)	Verificar a magnitude da pressão de GNL	Sensor não operacional	1) falha no sensor 2) falha no registrador/ condicionador de sinais 3) falha nos contatos elétricos da fiação do sensor	1) perda de indicação da pressão na saída da respectiva bomba 2) possibilidade de haver oscilação de pressão e fluxo na tubulação da respectiva bomba, levando a um descarregamento instável do GNL do tanque 3) Sistema de Carga e Descarga operando com falha no Sistema de Monitoramento.
		operação intermitente	1) falha no sensor 2) falha no registrador/ condicionador de sinais 3) falha nos contatos elétricos da fiação do sensor	1) perda momentânea de indicação da pressão na saída da respectiva bomba 2) possibilidade de haver oscilação momentânea de pressão e fluxo na tubulação da respectiva bomba, levando a um descarregamento instável do GNL do tanque 3) Sistema de Carga e Descarga operando com falha no Sistema de Monitoramento.

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Sensores de Pressão de Boil-off (PG1, PG2, PG3, PG4)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Sensores de Pressão de Boil-off (PG1, PG2, PG3, PG4)	Registrar a pressão de Boil-off em cada tanque	Sensor não operacional	1) falha no sensor 2) falha no registrador/ condicionador de sinais 3) falha nos contatos elétricos da fiação do sensor	1) perda de indicação da pressão de Boil-off no respectivo tanque 2) falha no monitoramento das condições do Boil-off dentro do respectivo tanque 3) Sistema de Carga e Descarga operando normalmente, mas com dificuldade em tomar ações preventivas devido a falha do sensor.
		operação intermitente	1) falha no sensor 2) falha no registrador/ condicionador de sinais 3) falha nos contatos elétricos da fiação do sensor	1) perda momentânea de indicação da pressão do Boil-off no respectivo tanque 2) falha momentânea no monitoramento das condições do Boil-off dentro do respectivo tanque 3) Sistema de Carga e Descarga operando normalmente, mas com dificuldade momentânea em tomar ações preventivas devido a falha do sensor.

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Sensores de Pressão de Boil-off (PG5, PG6, PG7, PG8)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Sensores de Pressão de Boil-off (PG5, PG6, PG7, PG8)	Registrar a pressão de Boil-off na entrada ou saída do Compressor	Sensor não operacional	1) falha no sensor 2) falha no registrador/ condicionador de sinais 3) falha nos contatos elétricos da fiação do sensor	1) perda de indicação da pressão de Boil-off no respectivo compressor 2) falha no monitoramento das condições do Boil-off no respectivo compressor 3) Sistema de Carga e Descarga operando normalmente, mas com dificuldade em tomar ações preventivas devido a falha do sensor.
		operação intermitente	1) falha no sensor 2) falha no registrador/ condicionador de sinais 3) falha nos contatos elétricos da fiação do sensor	1) perda momentânea de indicação da pressão do Boil-off no respectivo compressor 2) falha momentânea no monitoramento das condições do Boil-off no respectivo compressor 3) Sistema de Carga e Descarga operando normalmente, mas com dificuldade momentânea em tomar ações preventivas devido a falha do sensor.

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Sensores de Pressão de Boil-off (PG9)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Sensores de Pressão de Boil-off (PG9)	Registrar a pressão de Boil-off no manifold	Sensor não operacional	1) falha no sensor 2) falha no registrador/ condicionador de sinais 3) falha nos contatos elétricos da fiação do sensor	1) perda de indicação da pressão de Boil-off no manifold 2) falha no monitoramento das condições do Boil-off no manifold 3) Sistema de Carga e Descarga operando normalmente, mas com dificuldade em tomar ações preventivas devido a falha do sensor.
		operação intermitente	1) falha no sensor 2) falha no registrador/ condicionador de sinais 3) falha nos contatos elétricos da fiação do sensor	1) perda momentânea de indicação da pressão do Boil-off no manifold 2) falha momentânea no monitoramento das condições do Boil-off no manifold 3) Sistema de Carga e Descarga operando normalmente, mas com dificuldade momentânea em tomar ações preventivas devido a falha do sensor.

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Sensores de Presença de Gás (DG1, DG2, DG3, DG4)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Sensores de Presença de Gás (DG1, DG2, DG3, DG4)	Indicar presença de gás de Boil-off na saída das válvulas de alívio de pressão presentes em cada tanque	Sensor não detecta gás	1) falha no sensor 2) falha no registrador/condicionador de sinais 3) falha nos contatos elétricos da fiação do sensor	1) perda de indicação da presença de gás 2) falha no monitoramento das condições do Boil-off dentro do respectivo tanque 3) Sistema de Carga e Descarga operando normalmente, mas com dificuldade em tomar ações preventivas devido a falha do sensor.

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Tanque (Tanques 1, 2, 3 e 4)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Tanque (Tanques 1, 2, 3 e 4)	Armazenar GNL e isolá-lo termicamente	Vazamento de GNL	1) presença de trincas	1) possível queda no nível de GNL do tanque 2) queda de temperatura no local do vazamento 3) presença de GNL no exterior do tanque 4) Sistema de Carga e Descarga do Navio opera em estado de falha
		Aquecimento não previsto do GNL	1) falha no isolamento térmico do tanque	1) queda de temperatura na região externa ao isolamento 2) aumento da geração de Boil-off no interior do tanque 3) possível aumento de pressão do Boil-off no interior do tanque 4) Sistema de Carga e Descarga do Navio opera em estado de falha

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Tubulação de GNL
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Tubulação de GNL	Conduzir o GNL entre tanques de armazenamento e manifold	Ruptura	1) Pressão de operação superior a especificada em projeto 2) Corrosão na parede da tubulação 3) Falha em conexões ou uniões soldadas 4) Sobrecarregamento mecânico devido a falhas em suportes	1) Vazamento de GNL 2) Queda de temperatura no local do vazamento 3) Queda de pressão na tubulação 4) Sistema de Carga e Descarga do Navio opera em estado de falha
		Bloqueio Parcial	1) Acúmulo de detritos	1) Possível redução do fluxo de GNL 2) Redução da capacidade de carregamento ou descarregamento de GNL 3) Possível aumento de pressão na tubulação 4) Sistema de Carga e Descarga do Navio opera em estado de falha
		Bloqueio Total	1) Acúmulo de detritos	1) Não há fluxo de GNL 2) Não há carregamento ou descarregamento de GNL 3) Alta pressão do GNL na tubulação 4) Sistema de Carga e Descarga do Navio inoperante

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Tubulação de Boil-off
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Tubulação de Boil-off	Conduzir o Boil-off entre tanques de armazenamento e manifold	Ruptura	1) Pressão de operação superior a especificada em projeto 2) Corrosão na parede da tubulação 3) Falha em conexões ou uniões soldadas 4) Sobrecarregamento mecânico devido a falhas em suportes	1) Vazamento de Boil-off 2) Queda de temperatura no local do vazamento 3) Queda de pressão na tubulação 4) Sistema de Carga e Descarga do Navio opera em estado de falha
		Bloqueio Parcial	1) Acúmulo de detritos	1) Possível redução do fluxo de Boil-off 2) Redução da capacidade de descarregamento de Boil-off 3) Possível aumento de pressão na tubulação 4) Sistema de Carga e Descarga do Navio opera em estado de falha
		Bloqueio Total	1) Acúmulo de detritos	1) Não há fluxo de Boil-off 2) Não há carregamento ou descarregamento de Boil-off 3) Alta pressão do Boil-off na tubulação 4) Sistema de Carga e Descarga do Navio inoperante

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Tubulação de Alívio de Pressão
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Tubulação de Alívio de Pressão	Conduzir GNL entre sua tubulação e os tanques do navio, evitando um aumento de pressão na tubulação de GNL	Ruptura	1) Pressão de operação superior a especificada em projeto 2) Corrosão na parede da tubulação 3) Falha em conexões ou uniões soldadas 4) Sobrecarregamento mecânico devido a falhas em suportes	1) Possível vazamento de GNL 2) Queda de temperatura no local do vazamento 3) Sistema de Carga e Descarga do Navio opera em estado de falha
		Bloqueio Parcial	1) Acúmulo de detritos	1) Possível redução do fluxo de GNL 2) Possível aumento de pressão na tubulação de alívio 3) Sistema de Carga e Descarga do Navio opera em estado de falha
		Bloqueio Total	1) Acúmulo de detritos	1) Não há fluxo de GNL 2) Não há alívio de pressão na Tubulação de GNL 3) Possível aumento de pressão na tubulação de GNL 4) Sistema de Carga e Descarga do Navio opera em estado de falha

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Válvulas de Alívio (CR103, CR203, CR303, CR403, CR700, CR011, CR021, CR031, CR013, CR023, CR033)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Válvulas de Alívio (CR103, CR203, CR303, CR403, CR700, CR011, CR021, CR031, CR013, CR023, CR033)	Limitar a pressão de GNL em sua tubulação	Não abre	1) travamento de componentes 2) quebra de componentes	1) não há controle de pressão máxima na tubulação de GNL 2) possível aumento na pressão da tubulação de GNL 3) Sistema de Carga e Descarga de GNL operando com falha de segurança
		Permanentemente aberta	1) falha de componentes mecânicos	1) não há controle de pressão na tubulação de GNL 2) diminuição da pressão da tubulação de GNL 3) descarregamento de GNL fica mais demorado 4) Sistema de Carga e Descarga de GNL operando com falha no sistema de alívio de pressão
		Válvula mal calibrada	1) histerese nas molas da válvula 2) desgaste nas vedações	1) não há controle de pressão na tubulação de GNL 2) possível diminuição na pressão da tubulação de GNL 3) descarregamento de GNL fica mais demorado 4) Sistema de Carga e Descarga de GNL operando com falha no sistema de alívio de pressão

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Válvulas de Alívio (CR100, CR101, CR200, CR201, CR300, CR301, CR400, CR401)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Válvulas de Alívio (CR100, CR101, CR200, CR201, CR300, CR301, CR400, CR401)	Limitar a pressão de GNL em sua tubulação	Não abre	1) travamento de componentes 2) quebra de componentes	1) não há controle de pressão máxima de Boil-off no respectivo tanque 2) possível aumento na pressão de Boil-off no respectivo tanque 3) Sistema de Carga e Descarga de GNL operando com falha de segurança
		Permanentemente aberta	1) falha de componentes mecânicos	1) não há controle de pressão de Boil-off no respectivo tanque 2) diminuição da pressão de Boil-off no respectivo tanque 3) vazamento de Boil-off pelo riser 4) Sistema de Carga e Descarga de GNL operando com falha no sistema de alívio de pressão
		Válvula mal calibrada	1) histerese nas molas da válvula 2) desgaste nas vedações	1) não há controle de pressão de Boil-off no respectivo tanque 2) possível diminuição na pressão de Boil-off no respectivo tanque 3) vazamento de Boil-off pelo riser 4) Sistema de Carga e Descarga de GNL operando com falha no sistema de alívio de pressão

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Válvula de Controle de Fluxo do tipo Globo (CL101, CL102, CL201, CL202, CL301, CL302, CL401, CL402)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Válvula de Controle de Fluxo do tipo Globo (CL101, CL102, CL201, CL202, CL301, CL302, CL401, CL402)	Controlar o Fluxo de GNL	falha aberta	1) travamento das partes móveis 2) desgaste das partes móveis 3) falha no atuador	1) Não há controle do fluxo de GNL 2) Impossibilidade de cessar a vazão de GNL 3) Válvula inoperante
		falha parcialmente aberta	1) travamento das partes móveis 2) desgaste das partes móveis 3) falha no atuador	1) Impossibilidade de atingir vazão total, não há controle do fluxo de GNL 2) Possível aumento de pressão do GNL na tubulação 3) Válvula inoperante
		falha fechada	1) travamento das partes móveis 2) desgaste das partes móveis 3) falha no atuador	1) Não há fluxo de GNL 2) Possível aumento de pressão do GNL na tubulação 3) Válvula inoperante 4) Não é possível carregar ou descarregar o respectivo tanque de GNL
		vazamento na válvula	1) desgaste das vedações 2) dilatação/contração imprópria de componentes mecânicos 3) presença de trincas na estrutura	1) Vazamento de GNL 2) Queda de temperatura no local do vazamento 3) Possível queda de pressão na tubulação

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Válvula de Controle de Fluxo do tipo Borboleta (CL100, CL107, CL200, CL207, CL300, CL307, CL400, CL407)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Válvula de Controle de Fluxo do tipo Borboleta (CL100, CL107, CL200, CL207, CL300, CL307, CL400, CL407)	Controlar o Fluxo de GNL	falha aberta	1) travamento das partes móveis 2) desgaste das partes móveis 3) falha no atuador	1) Não há controle do fluxo de GNL 2) Impossibilidade de cessar a vazão de GNL 3) Válvula inoperante
		falha parcialmente aberta	1) travamento das partes móveis 2) desgaste das partes móveis 3) falha no atuador	1) Impossibilidade de atingir vazão total, não há controle do fluxo de GNL 2) Possível aumento de pressão do GNL na tubulação 3) Válvula inoperante
		falha fechada	1) travamento das partes móveis 2) desgaste das partes móveis 3) falha no atuador	1) Não há fluxo de GNL 2) Possível aumento de pressão do GNL na tubulação 3) Válvula inoperante 4) Não é possível carregar ou descarregar o respectivo tanque de GNL
		vazamento na válvula	1) desgaste das vedações 2) dilatação/contração imprópria de componentes mecânicos 3) presença de trincas na estrutura	1) Vazamento de GNL 2) Queda de temperatura no local do vazamento 3) Possível queda de pressão na tubulação

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Válvula de Controle de Fluxo do tipo Borboleta (CL013, CL023, CL033)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Válvula de Controle de Fluxo do tipo Borboleta (CL013, CL023, CL033)	Controlar o Fluxo de GNL	falha aberta	1) travamento das partes móveis 2) desgaste das partes móveis 3) falha no atuador	1) Não há controle do fluxo de GNL 2) Impossibilidade de cessar a vazão de GNL 3) Válvula inoperante
		falha parcialmente aberta	1) travamento das partes móveis 2) desgaste das partes móveis 3) falha no atuador	1) Impossibilidade de atingir vazão total, não há controle do fluxo de GNL 2) Possível aumento de pressão do GNL na tubulação 3) Válvula inoperante
		falha fechada	1) travamento das partes móveis 2) desgaste das partes móveis 3) falha no atuador	1) Não há fluxo de GNL no manifold 2) Possível aumento de pressão do GNL na tubulação 3) Válvula inoperante
		vazamento na válvula	1) desgaste das vedações 2) dilatação/contração imprópria de componentes mecânicos 3) presença de trincas na estrutura	1) Vazamento de GNL 2) Queda de temperatura no local do vazamento 3) Possível queda de pressão na tubulação

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Válvula de Controle de Fluxo do tipo Borboleta (CG900, CG903, CG904, CG915, CG916)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Válvula de Controle de Fluxo do tipo Borboleta (CG900, CG903, CG904, CG915, CG916)	Controlar o Fluxo de Boil-off	falha aberta	1) travamento das partes móveis 2) desgaste das partes móveis 3) falha no atuador	1) Não há controle do fluxo de Boil-off 2) Impossibilidade de cessar a vazão de Boil-off 3) Válvula inoperante
		falha parcialmente aberta	1) travamento das partes móveis 2) desgaste das partes móveis 3) falha no atuador	1) Impossibilidade de atingir vazão total, não há controle do fluxo de Boil-off 2) Possível aumento de pressão do Boil-off na tubulação 3) Válvula inoperante
		falha fechada	1) travamento das partes móveis 2) desgaste das partes móveis 3) falha no atuador	1) Não há fluxo de Boil-off 2) Possível aumento de pressão do Boil-off na tubulação 3) Válvula inoperante
		vazamento na válvula	1) desgaste das vedações 2) dilatação/contração imprópria de componentes mecânicos 3) presença de trincas na estrutura	1) Perda parcial do controle do fluxo de Boil-off 2) vazamento de Boil-off 3) riscos inerentes ao vazamento de Boil-off

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Válvula de Bloqueio do tipo Borboleta (CL011, CL022, CL031)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Válvula de Bloqueio do tipo Borboleta (CL011, CL022, CL031)	Permitir ou não o Fluxo de GNL	falha aberta	1) travamento das partes móveis 2) desgaste das partes móveis 3) falha no atuador	1) Há fluxo constante de GNL 2) Impossibilidade de cessar a vazão de GNL 3) Válvula inoperante
		falha fechada	1) travamento das partes móveis 2) desgaste das partes móveis 3) falha no atuador	1) Não há fluxo de GNL no manifold 2) Aumento de pressão do Boil-off na tubulação 3) Válvula inoperante
		vazamento na válvula	1) desgaste das vedações 2) dilatação/contração imprópria de componentes mecânicos 3) presença de trincas na estrutura	1) Vazamento de GNL 2) Queda de temperatura na região exterior ao vazamento 3) Possível queda de pressão do GNL na tubulação

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Válvula de Bloqueio do tipo Borboleta (CG100, CG200, CG300, CG400, CG704, CG071)
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Válvula de Bloqueio do tipo Borboleta (CG100, CG200, CG300, CG400, CG704, CG071)	Permitir ou não o Fluxo de Boil-off	falha aberta	1) travamento das partes móveis 2) desgaste das partes móveis 3) falha no atuador	1) Há fluxo constante de Boil-off 2) Impossibilidade de cessar a vazão de Boil-off 3) Válvula inoperante
		falha fechada	1) travamento das partes móveis 2) desgaste das partes móveis 3) falha no atuador	1) Não há fluxo de Boil-off 2) Aumento de pressão do Boil-off na tubulação 3) Válvula inoperante
		vazamento na válvula	1) desgaste das vedações 2) dilatação/contração imprópria de componentes mecânicos 3) presença de trincas na estrutura	1) Vazamento de Boil-off 2) Queda de temperatura na região exterior ao vazamento 3) Possível queda de pressão do Boil-off na tubulação

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Válvulas de Retenção CL105, CL205, CL305, CL405, CL106, CL206, CL306, CL 406.
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Válvulas de Retenção CL105, CL205, CL305, CL405, CL106, CL206, CL306, CL 406.	evitar o retorno de fluido pressuriza do na saída da bomba	Válvula não opera	1) quebra de elementos mecânicos 2) desgaste excessivo das vedações	1) não há proteção contra retorno de fluido na saída da respectiva bomba 2) falha na proteção da respectiva bomba 3) possibilidade de perda ou flutuação de pressão no fluxo do GNL 4) possibilidade de redução no fluxo de descarregamento do respectivo tanque de GNL 5) Sistema de Carga e Descarga operando com falha no Sistema de Bombeio Principal.
		Vazamento na válvula	1) desgaste das vedações 2) dilatação/contração imprópria de componentes mecânicos 3) presença de trincas na estrutura	1) há perda na proteção contra retorno de fluxo fluido na respectiva bomba 2) falha na proteção da bomba 3) perda ou flutuação de pressão no fluxo do GNL 4) redução no fluxo de descarregamento do respectivo tanque de GNL 5) Sistema de Carga e Descarga operando com falha no Sistema de Bombeio Principal.
		Travamento fechado da válvula	1) quebra de componentes mecânicos	1) não há fluxo de GNL na saída da respectiva bomba 2) não há alimentação de fluido para a tubulação de GNL 3) não há descarregamento do respectivo tanque de GNL 4) Sistema de Carga e Descarga operando com falha no Sistema de Bombeio Principal.

Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	
<i>Componente:</i>	Válvulas de Retenção (CG911, CG912).
<i>Sistema:</i>	Sistema de Carga e Descarga do Navio Metaneiro
<i>Equipe:</i>	
<i>Responsável:</i>	

Componente	Função	Modo de Falha Potencial	Causa(s) da falha	Efeito Potencial da Falha
Válvulas de Retenção (CG911, CG912).	evitar o retorno de fluido pressurizado na saída do compressor	Válvula não opera	1) quebra de elementos mecânicos 2) desgaste excessivo das vedações	1) não há proteção contra retorno de fluido na saída do respectivo compressor 2) falha na proteção do respectivo compressor 3) possibilidade de perda ou flutuação de pressão no fluxo de Boil-off 4) possibilidade de redução no fluxo de descarregamento de Boil-off 5) Sistema de Carga e Descarga operando com falha no Sistema de Compressão
		Vazamento na válvula	1) quebra de componentes mecânicos 2) desgaste das vedações 3) presença de trincas na estrutura	1) possível perda na proteção contra retorno de fluido no respectivo compressor 2) vazamento de Boil-off 3) riscos inerentes ao vazamento de Boil-off 4) Sistema de Carga e Descarga operando com falha no Sistema de Bombeio Principal.
		Travamento fechado da válvula	1) quebra de componentes mecânicos	1) não há fluxo de Boil-off na saída da respectivo compressor 2) não há descarregamento de Boil-off 3) aumento da pressão de Boil-off 4) Sistema de Carga e Descarga operando com falha no Sistema de Compressão.

APÊNDICE C - ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS

Figura C.1 - "PG1 indica pressão limite" para o Sistema de Boil-off

Fonte: Própria

Figura C.2 - "PG2 indica pressão limite" para o Sistema de Boil-off

Fonte: Própria

Figura C.3 - "PG3 indica pressão limite" para o Sistema de Boil-off

Fonte: Própria

Figura C.4 - "PG4 indica pressão limite" para o Sistema de Boil-off

Fonte: Própria

Figura C.5 - "PG1 indica pressão acima da limite" para o Sistema de Boil-off

Fonte: Própria

Figura C.6 - "PG2 indica pressão acima da limite" para o Sistema de Boil-off

Fonte: Própria

Figura C.7 - "PG3 indica pressão acima da limite" para o Sistema de Boil-off

Fonte: Própria

Figura C.8 - "PG4 indica pressão acima da limite" para o Sistema de Boil-off

Fonte: Própria

Figura C.9 - "DG1 detecta gás" para o Sistema de Boil-off

Fonte: Própria

Figura C.10 - "DG2 detecta gás" para o Sistema de Boil-off

Fonte: Própria

Figura C.11 - "DG3 detecta gás" para o Sistema de Boil-off

Fonte: Própria
Figura C.12 - "DG4 detecta gás" para o Sistema de Boil-off

Fonte: Própria

Figura C.13 - "PG5 acima do esperado" para o Sistema de Boil-off

Fonte: Própria

Figura C.14 - "PG6 acima do esperado" para o Sistema de Boil-off

Fonte: Própria

Figura C.15 - "PG6 abaixo do esperado" para o Sistema de Boil-off

Fonte: Própria

Figura C.16 - "PG5 abaixo da pressão atmosférica" para o Sistema de Boil-off

Fonte: Própria

Figura C.17 - "LI1 acima do esperado" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.18 - "LI2 acima do esperado" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.19 - Continuação de "LI2 acima do esperado" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.20 - "LI3 acima do esperado" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.21 - "LI4 acima do esperado" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.22 - "PL1 indica pressão acima da limite" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.23 - "PL2 indica pressão acima da limite" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.24 - "PL3 indica pressão acima da limite" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.25 - "PL4 indica pressão acima da limite" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.26 - "PL1 indica pressão limite" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.27 - "PL2 indica pressão limite" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.28 - "PL3 indica pressão limite" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.29 - "PL4 indica pressão limite" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.30 - "PL1 indica pressão abaixo do esperado" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.31 - "PL2 indica pressão abaixo do esperado" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.32 - "PL3 indica pressão abaixo do esperado" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.33 - "PL4 indica pressão abaixo do esperado" para o Sistema de Descarga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.34 - "PL1 indica pressão acima da limite" para o Sistema de Carga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.35 - "PL2 indica pressão acima da limite" para o Sistema de Carga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.36 - "PL3 indica pressão acima da limite" para o Sistema de Carga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.37 - "PL4 indica pressão acima da limite" para o Sistema de Carga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.38 - "PL1 indica pressão limite" para o Sistema de Carga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.39 - "PL2 indica pressão limite" para o Sistema de Carga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.40 - "PL3 indica pressão limite" para o Sistema de Carga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.41 - "PL4 indica pressão limite" para o Sistema de Carga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.42 - "PL1 indica pressão abaixo do esperado" para o Sistema de Carga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.43 - "PL2 indica pressão abaixo do esperado" para o Sistema de Carga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.44 - "PL3 indica pressão abaixo do esperado" para o Sistema de Carga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.45 - "PL4 indica pressão abaixo do esperado" para o Sistema de Carga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.46 - "LI1 abaixo do esperado" para o Sistema de Carga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.47 - "LI2 abaixo do esperado" para o Sistema de Carga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.48 - "LI3 abaixo do esperado" para o Sistema de Carga de GNL

Fonte: Própria

Figura C.49 - "LI4 abaixo do esperado" para o Sistema de Carga de GNL

Fonte: Própria