

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

P

P

E

Q



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Desenvolvimento de Metodologia Bayesiana de
Análise Quantitativa de Risco para Terminais
Offshore de GNL: Aplicação para o Porto de Suape**

Marilia Abílio Ramos

Orientadores: Profa. Celmy Maria Menezes Barbosa

Prof. Enrique Andrés López Droguett

Recife/PE

Janeiro/2012

MARILIA ABÍLIO RAMOS

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA BAYESIANA DE ANÁLISE
QUANTITATIVA DE RISCO PARA TERMINAIS OFFSHORE DE GNL:
APLICAÇÃO PARA O PORTO DE SUAPE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de concentração: Tecnologia do Petróleo e do Gás Natural

Orientadores: Profa. Celmy Barbosa
Prof. Enrique Droguett

Recife
2012

*Aos meus pais, Francisco e Rinalda, e à
minha irmã, Mariana, sem os quais nada teria
sido possível.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Francisco e Rinalda, por sempre me incentivarem a fazer o meu melhor. Por serem meus mentores intelectuais e emocionais, e por estarem sempre presentes. Por me fazerem procurar sempre o caminho que leva aos melhores frutos, e por estarem ao meu lado na hora de colhê-los.

Agradeço a minha irmã, Mariana, por estar sempre disponível para revisar meus textos e me ajudar com as questões acadêmicas. Pelo amor e apoio incondicional, e por ser o meu porto seguro.

Agradeço ao professor Enrique López pela orientação e pela dedicação. Agradeço por ter me trazido a ideia desta dissertação, fazendo com que eu me aprofundasse em matérias antes desconhecidas para mim, e por ter confiança de que eu seria capaz. Pela paciência para me explicar desde os conceitos mais básicos aos mais avançados, e pelas horas que passou fazendo isso.

Agradeço aos professores da Pós-Graduação em Engenharia Química da UFPE pela minha formação profissional.

Agradeço à Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, pelo apoio financeiro durante o mestrado. Agradeço ao Programa de Recursos Humanos PRH-28 pelos cursos de aprofundamento e pela complementação da minha formação acadêmica, especialmente à coordenadora Celmy Barbosa e ao pesquisador visitante Paulo Estevão, pela dedicação ao programa e aos alunos.

Agradeço aos colegas do Centro de Estudos e Ensaios em Risco e Modelagem Ambiental – CEERMA, por fazer do cotidiano de trabalho um momento sempre agradável, e por fazer do CEERMA o espaço colaborativo que é.

Agradeço ao professor Marcelo Martins pelo acesso que forneceu ao software PHAST e pela disponibilidade em me ajudar no que precisasse. Agradeço também a Henrique Pimenta por todas as valiosas dicas que me deu para que eu dominasse melhor o software, e por fazê-lo sempre de forma tão solícita.

Agradeço aos meus colegas de mestrado pelas horas que passamos juntos estudando, pelas conversas e risadas, e pelos momentos de lazer que tornaram o tempo do mestrado mais alegre. Agradeço especialmente a Bruno Ferreira, Marteson Cristiano e José Eustáquio pela amizade e pelo companheirismo.

Agradeço aos meus amigos pela compreensão dos meus momentos de ausência durante o mestrado, e pelo abraço aconchegante que sempre me aguarda quando os encontro. Agradeço nominalmente a Bruno Jerônimo, Cinthia Quaresma, Jane Érika, Rafael Formiga e Rita Kramer, pelo simples fato de fazerem parte da minha vida.

Agradeço a Henrique Lins por toda a paciência e compreensão. Pelas noites e fins-de-semana que passou revisando meus textos, pela ajuda nas traduções e formatações e por tudo aquilo que eu não teria tido tempo de fazer sem sua ajuda. Pelo equilíbrio emocional e palavras de consolo e de incentivo. Por ter sido um parceiro de trabalho nessa dissertação e por ser um parceiro de vida. Pelo amor e carinho, acima de tudo.

De forma geral, a todos os que contribuíram direta ou indiretamente com esse trabalho, seja com ajuda acadêmica ou com uma cerveja gelada, e que não tive espaço suficiente para citar aqui: muito obrigada.

RESUMO

O uso do Gás Natural Liquefeito – GNL tem aumentado consideravelmente nas últimas décadas, refletindo uma transição do Gás Natural, que passou de subproduto indesejável da exploração de petróleo a promissora fonte de energia. O GNL é obtido através da liquefação do gás natural e apresenta diversas características favoráveis, entre elas a facilidade no transporte e armazenamento. A estocagem, regaseificação e envio do GNL aos consumidores finais é feita em terminais de armazenamento e regaseificação, que podem ser *onshore* ou *offshore* – sendo esse último uma tendência mundial. Por causa da natureza inflamável do metano, em caso de acidentes com vazamento de GNL esses terminais podem oferecer perigo às comunidades próximas a eles, tais como incêndio da poça de GNL formada ou da nuvem proveniente da evaporação da poça. Nesse contexto, é essencial a realização da Análise Quantitativa de Risco sobre os terminais, de forma a avaliar os riscos aos quais estão expostas as comunidades vizinhas e se estes estão dentro do estabelecido pelas normas em vigor. Para cálculo do risco é necessária a quantificação das consequências do acidente e de sua frequência. Entretanto, no caso de indústrias relativamente recentes, como do GNL, os dados de frequência de acidentes e falhas de equipamentos são esparsos, não sendo estatisticamente confiáveis. A análise Bayesiana tem se mostrado uma excelente ferramenta para lidar com este tipo de situação, pois permite o uso de dados específicos da planta estudada juntamente com informações obtidas em outras indústrias, com mais tempo de existência e portanto dados de taxas de falha de equipamentos mais confiáveis. Além disso, a análise Bayesiana pode fazer uso de dados empíricos e opiniões de especialistas como evidências para atualização da estimativa inicial da frequência. Como os dados obtidos nos bancos de dados são provenientes de diversas indústrias, funcionando em diferentes condições de processo, é necessário considerar a não-homogeneidade da população quanto à taxa de falha. Dessa forma, a melhor metodologia a ser empregada é a Análise Bayesiana em Dois Estágios. O primeiro estágio é uma análise não-homogênea, em que é considerada a variabilidade populacional da taxa de falha entre os bancos de dados. Esta primeira etapa da análise gera um valor a ser utilizado como a priori no segundo estágio, no qual é utilizado um dado específico da planta de interesse como evidência. A metodologia de Análise Quantitativa de Risco fazendo uso da Análise Bayesiana em Dois Estágios para determinação da frequência de acidentes foi aplicada a um terminal *offshore* de Gás Natural Liquefeito hipotético no Porto de Suape. Para tal, foi estudado o processo de armazenamento e regaseificação de GNL, realizada a análise preliminar de perigo com base no fluxograma desenvolvido, calculadas as consequências e determinadas as frequências dos acidentes considerados. A aplicação da Análise Bayesiana em Dois Estágios limitou-se ao primeiro estágio, por não existirem dados específicos de falha no terminal, por ser hipotético. A partir das frequências foram geradas as árvores de eventos e calculados os riscos individuais. O cálculo do risco individual mostrou que o risco ao qual as pessoas localizadas no Porto de Suape estão expostas no caso de existência do terminal offshore considerado é inferior ao limite estabelecido pela norma de referência da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB.

Palavras-chave: Análise Quantitativa de Risco, Gás Natural Liquefeito, Análise Bayesiana em Dois Estágios, Terminal offshore de GNL

ABSTRACT

The use of Liquefied Natural Gas – LNG has been increasing at a considerable rate in the last decades, reflecting a transition of the LNG, which stopped being an undesirable byproduct of the petroleum exploitation to become a promising energy source. The LNG is obtained by the liquefaction of natural gas and has many favorable characteristics, such as the ease of transportation and storage. The storage, regasification and shipping to the final consumers is done at storage and regasification terminals, which can be either onshore or offshore – the last one being a global trend. Because of the flammable nature of methane, in cases of accident involving LNG leaks, the terminals can endanger communities located in areas around them, potentially exposing them to hazards like fires in the LNG pool or the cloud created by the evaporation of the LNG pool. In this context, it is essential to do Quantitative Risk Analysis for the terminals, in a way to evaluate the risks for which the nearby communities are exposed to, as well as if these risks are within the limits established by the appropriate regulations. In order to calculate the risk, it is necessary to quantify the consequences of the accident and its frequency. In case of relatively recent industries, like the LNG industry, however, data regarding the frequency of accidents and equipment failures are sparse, thus not statistically reliable. The Bayesian analysis has proven to be an outstanding tool to deal with this kind of situation, because it allows the use of data specific to the studied plant in conjunction with information from other industries, usually older and, therefore, with more reliable data regarding equipment failure rate. Also, Bayesian analysis can make use of empiric data and specialists opinions as evidence to update the initial frequency estimative. Because the data obtained from databases come from different industries that are working at different process conditions, it is necessary to consider the population's lack of homogeneity regarding failure rate. This way, the best methodology to be used is the Two Stages Bayesian Analysis. The first stage is a inhomogeneous analysis, in which is considered the population variability of the failure rate between the databases. This first stage generates a value to be used as a *priori* in the second stage, in which a plant specific data is used as evidence. The Quantitative Risk Analysis with Two Stages Bayesian Analysis methodology, in order to determine the frequency of accidents, was applied to a hypothetical offshore LNG terminal locate in the Suape Port. In order to accomplish that, both the storage and regasification of LNG were studied, the preliminary danger analysis based on the developed flowchart was done, the consequences were calculated and the frequencies of the considered accidents were determined. The application of the Two Stage Bayesian Analysis was limited to the first stage, since specific data regarding failures at the hypothetical terminal do not exist. From the frequencies, the event trees were generated and the individual risks were calculated. The calculation of the individual risk showed that the risk to which people in the Suape Port area are subjected is inferior to the limit established by CETESB.

Key-words: Quantitative Risk Analysis, Liquefied Natural Gas, Two Stages Bayesian Analysis, Offshore LNG Terminal

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Participação do gás natural na oferta primária de energia no mundo em 2006	20
Figura 2.2: Participação do gás natural na produção mundial de energia elétrica em 2006	20
Figura 2.3: Reservas provada de gás natural no Brasil	21
Figura 2.4: Custo do transporte de gás natural pela distância	22
Figura 2.5: Etapas da cadeia de GNL	22
Figura 2.6: Composição do gás natural e do GNL	23
Figura 2.7: Esquema básico do processo de recebimento, estocagem e regaseificação de GNL nos terminais	24
Figura 2.8: O Golar Spirit (à direita) e o navio supridor de GNL atracados no Porto de Pecém	25
Figura 2.9: Projetos de FSRUs em operação, sancionados e propostos no mundo	26
Figura 2.10: Possíveis consequências de um derramamento de GNL	27
Figura 3.1: Metodologia de Análise Quantitativa de Risco	35
Figura 3.2: Árvore de Eventos para da liberação de Gás Natural Liquefeito	41
Figura 3.3: Árvore de Eventos para liberação de Gás Natural	41
Figura 3.4: Apresentação das curvas de iso-risco	45
Figura 3.5: Limites de risco social estabelecidos pela CETESB (2003) em curva F-N	47
Figura 4.1: Influência da distribuição a priori e da verossimilhança na distribuição a posteriori pela teorema de Bayes,	51
Figura 4.2: Exemplo de distribuição conjunta de probabilidade de $\underline{\theta} = \{\theta_1, \theta_2\}$	55
Figura 5.1: Análise Bayesiana em Dois Estágios	59
Figura 5.2: Metodologia de AQR para um terminal de GNL com uso da Análise Bayesiana em Dois Estágios	60
Figura 5.3: Ilustração de freqüências de um determinado evento em plantas de GNL	61
Figura 5.4: Curva de variabilidade populacional hipotética	62
Figura 5.5: Resultados das estimativas da variabilidade populacional	73

Figura 6.1: Fluxograma de processo de recebimento, armazenamento e regaseificação de GNL no terminal offshore	76
Figura 6.2: distribuição dos cenários quanto à sua severidade	77
Figura 6.3: Posição do terminal considerado	83
Figura 6.4: Distribuição a posteriori dos parâmetros da variabilidade populacional	88
Figura 6.5: Distribuição acumulada esperada da variabilidade populacional da frequência do Evento Iniciador EI01	89
Figura 6.6: Função densidade de probabilidade da variabilidade populacional esperada das frequências do Evento Iniciador EI01	89
Figura 6.7: Função densidade de probabilidade da variabilidade populacional esperada das frequências do Evento Iniciador EI02	91
Figura 6.8: Função densidade de probabilidade da variabilidade populacional esperada das frequências do Evento Iniciador 3	92
Figura 6.9: Função densidade de probabilidade da variabilidade populacional esperada das frequências do Evento Iniciador 04	94
Figura 6.10: Função densidade de probabilidade da variabilidade populacional esperada das frequências do Evento Iniciador 05	95
Figura 6.11: Função densidade de probabilidade da variabilidade populacional esperada das frequências do Evento Iniciador 06	97
Figura 6.12: Árvore de Eventos do Evento Iniciador EI01	99
Figura 6.13: Árvore de Eventos do Evento Iniciador EI02	99
Figura 6.14: Árvore de Eventos do Evento Iniciador EI03	99
Figura 6.15: Árvore de Eventos do Evento Iniciador EI04	99
Figura 6.16: Árvore de Eventos do Evento Iniciador EI05	100
Figura 6.17: Árvore de Eventos do Evento Iniciador EI06	100
Figura 6.18: Curvas de iso-risco geradas pelos eventos do Terminal.	101
Figura 6.19: Risco gerado pelo evento EI01 atinge valores maiores que 10^{-5} ano^{-1} , limite máximo tolerável estabelecido pela CETESB	102
Figura 6.20: Curvas de iso-risco geradas pelos eventos do Terminal, excluindo-se o evento EI01.	102
Figura 6.21: Risco gerado pelo evento EI06	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Categorias de estabilidade Pasquill	36
Tabela 3.2: Exemplo de tabela de APP	37
Tabela 3.3: Categorias de severidade	38
Tabela 3.4: Probabilidades de ignição imediata para instalações estacionárias	41
Tabela 3.5: Probabilidade de Ignição Retardada	42
Tabela 3.6: Relação entre o Probit e a Probabilidade	42
Tabela 4.1: Distribuições conjugadas	52
Tabela 5.1: Modelos de verossimilhança mista	69
Tabela 6.1: Características dos Eventos Iniciadores	78
Tabela 6.2: Informações meteorológicas médias para a região do Porto de Suape	80
Tabela 6.3: Alcances das consequências do Evento Iniciador 01	81
Tabela 6.4: Alcances das consequências do Evento Iniciador 02	81
Tabela 6.5: Alcances das consequências do Evento Iniciador 03	81
Tabela 6.6: Alcances das consequências do Evento Iniciador 04	81
Tabela 6.7: Alcances das consequências do Evento Iniciador 05	81
Tabela 6.8: Alcances das consequências do Evento Iniciador 06	81
Tabela 6.9: Dados de falhas dos diversos bancos de dados utilizados	86
Tabela 6.10: Dados de falhas dos diversos bancos de dados utilizados	87
Tabela 6.11: Média e curvas percentuais da distribuição de variabilidade da frequência do EI01	90
Tabela 6.12: Dados utilizados como evidências no EI02	90
Tabela 6.13: Média e curvas percentuais da distribuição de variabilidade da frequência do EI02	91
Tabela 6.14: Dados utilizados como evidências no EI03	92
Tabela 6.15: Média e curvas percentuais da distribuição de variabilidade da frequência do EI03	93
Tabela 6.16: Dados utilizados como evidências no EI04	93

Tabela 6.17: Média e curvas percentuais da distribuição de variabilidade da frequência do EI04	_____94
Tabela 6.18: Dados utilizados como evidências no EI05	_____95
Tabela 6.19: Média e curvas percentuais da distribuição de variabilidade da frequência do EI05	_____96
Tabela 6.20: Dados utilizados como evidências no EI06	_____96
Tabela 6.21: Média e curvas percentuais da distribuição de variabilidade da frequência do EI06	_____96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Aiche – *American Institute of Chemical Engineers*

AQR – Análise Quantitativa de Risco

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

DNV - *Det Norske Veritas*

FSRU - *Floating Storage & Regasification Unit*

GN – Gás Natural

GNL – Gás Natural Liquefeito

GTL - *Gas to Liquid*

HGN – Hidratos de Gás Natural

ORV - *Open Rack Vaporiser*

REDUC - Refinaria de Duque de Caxias

RPT - *Rapid Phase Transition*

SCV - *Submerged Combustion Vaporisers*

TNO - *Netherlands Organization for Applied Scientific Research*

TRBA - Terminal de Regaseificação da Bahia

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução	13
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivos	17
1.3 Estrutura da Dissertação	18
Capítulo 2: O Gás Natural Liquefeito	19
2.1 Gás Natural Liquefeito	21
2.2 Perigos associados ao GNL	26
Capítulo 3: Análise Quantitativa de Risco e Aplicação em Terminais Offshore de GNL	30
3.1 Caracterização do empreendimento e da região	36
3.2 Identificação dos perigos e consolidação dos cenários acidentais	37
3.3 Estimativa das frequências de ocorrência dos acidentes	39
3.4 Estimativa das consequências dos acidentes – análise de vulnerabilidade	39
3.4.1 Árvore de Eventos -	40
3.4.2 Cálculo da Vulnerabilidade	42
3.5 Estimativa e avaliação dos riscos	43
3.5.1 Cálculo do Risco Individual	43
3.5.2 Cálculo do risco social	45
Capítulo 4: Conceitos da Análise Bayesiana	48
4.1 A Abordagem Bayesiana	48
4.2 Análise Bayesiana Homogênea	52
4.3 Análise Bayesiana Não-Homogênea	54

Capítulo 5: Metodologia Bayesiana de Análise Quantitativa de Risco para

Plantas de GNL	56
5.1 Primeiro Estágio	61
5.1.1 Distribuição a priori	64
5.1.2 Verossimilhança	65
5.1.3 Variabilidade populacional	72
5.2 Segundo Estágio	74

Capítulo 6: Aplicação da Metodologia em Terminal Offshore no Porto de

Suape	75
6.1 Análise de Consequências	77
6.2 Análise das Frequências	83
6.2.1 Distribuição a Priori	84
6.2.2 Evidências	84
6.2.3 Resultados	87
6.2.4 Árvores de Eventos	97
6.3 Cálculo dos Riscos Individuais	100

Capítulo 7: Conclusões e Trabalhos Futuros

Referências Bibliográficas	106
----------------------------	-----

Apêndice 6.1

Apêndice 6.2

Capítulo 1 - Introdução

Nos últimos 30 anos, o gás natural passou de quarta a segunda fonte de energia fóssil mais utilizada na produção mundial de energia elétrica, superado apenas pelo carvão (IEA, 2008). Este é um dos vários reflexos da transição consolidada deste combustível fóssil composto quase totalmente de metano: de um dos subprodutos menos desejado da exploração de petróleo, o gás natural tornou-se uma promissora fonte de energia. Os atrativos são, sobretudo, sua abundância e o fato de ser o mais limpo dos combustíveis fósseis. O crescimento de seu uso, entretanto, se vê em face de entraves tais como o transporte e a estocagem (KELKAR, 2008).

Uma tecnologia que permite superar as dificuldades de transporte e estocagem é a do Gás Natural Liquefeito (GNL)¹, proveniente da refrigeração do gás natural a -160°C e pressão atmosférica. A liquefação do gás reduz seu volume em 600 vezes, tornando-se mais econômico o seu transporte neste estado. A cadeia de valor do GNL consiste de quatro etapas interdependentes: exploração e produção do gás natural, sua liquefação, o transporte através de navios ou caminhões-tanque, sua estocagem e a regaseificação para envio ao consumidor final (CEE, 2007). Os terminais de estocagem e regaseificação do GNL podem ser *onshore* ou *offshore*, e estes, por sua vez, podem ser do tipo *Gravity Based System*, constituído de uma estrutura de concreto com base no fundo do mar, e *Floating Storage and Regasification Unit* (FSRU), navios com tanques de GNL e unidade de regaseificação *onboard*.

O Brasil possui atualmente dois terminais de regaseificação de GNL, ambos *offshore* do tipo FSRU – estando um em Pecém-CE e o outro na Baía de Guanabara-RJ, e terá mais um, também *offshore*, na Baía de Todos os Santos – BA. Ressalta-se que os terminais *offshore* apresentam vantagens sobre os terminais *onshore*, tais como flexibilidade, menor custo e maior rapidez no retorno de capital investido (BLACKWELL; SKAAR, 2009). Outro benefício apresentado pelos terminais *offshore* é a sua distância das áreas urbanas, o que pode reduzir os riscos às populações em caso de acidente com vazamento do produto (BLACKWELL; SKAAR, 2009; WIJNGAARDEN; OOMEN; HOORN, 2004).

¹ Nas próximas referências ao gás natural liquefeito, será utilizada apenas a sigla GNL.

1.1 Justificativa

Com o crescimento do uso do Gás Natural Liquefeito e consequente aumento do número de terminais de armazenamento e regaseificação, crescem também as preocupações quanto aos riscos aos quais estão expostas pessoas próximas às instalações em caso de um acidente. Wijngaarden, Oomen e Hoorn (2004), inclusive, ressaltam a opinião pública cada vez mais contrária à instalação de terminais onshore como um forte motivo para o maior interesse por construção terminais offshore, cujo distanciamento das comunidades pode submetê-las a menores riscos.

Apesar de a indústria de GNL ter registrado baixo número de acidentes nos últimos 40 anos, os riscos relacionados aos terminais podem estar crescendo com o aumento de sua quantidade (YUN, 2007). O estudo e a quantificação destes riscos são necessários para manter o baixo registro de acidentes da indústria e permitir, assim, que se continue aproveitando do Gás Natural como fonte de energia, com todas as vantagens que apresenta, e fazendo do uso de sua forma liquefeita para seu transporte e armazenamento.

Os principais perigos colocados por um acidente com vazamento de GNL em um terminal são relacionados a incêndio (WOODWARD; PITBLADO, 2010). Na existência de uma fonte de ignição no momento do vazamento, a poça formada é inflamada resultando em um incêndio em poça. Não ocorrendo ignição imediata, há a formação de uma nuvem de vapor que pode sofrer ignição se dentro dos limites de inflamabilidade do gás natural. Por causa de sua baixa temperatura, partículas de água presentes na atmosfera condensam dentro da nuvem, deixando-a densa e com baixa altitude. O fogo do incêndio em nuvem pode, portanto, entrar em contato com a poça que ainda está evaporando e causar um incêndio em poça retardado (LUKETA-HANLIN, 2005).

As radiações emitidas pelos incêndios em poça e em nuvem são relacionadas a probabilidades de fatalidade – vulnerabilidade – das pessoas expostas (CETESB, 2003). Através de uma análise de consequências, é possível prever a distância atingida por certo nível de radiação e consequente vulnerabilidade das pessoas atingidas. Combinando-se estes resultados com a frequência com que ocorre o acidente, tem-se o risco ao qual as pessoas estão expostas (AIChE, 2000).

As análises de consequência e vulnerabilidade constituem a Análise Quantitativa de Risco (AQR)², uma ferramenta que calcula as consequências dos acidentes, combinando-as com as frequências e probabilidades de ocorrerem, prevendo o risco ao qual estão expostas as pessoas na vizinhança do empreendimento (CAMACHO, 2004). A aplicação da AQR aos terminais de estocagem e regaseificação de GNL é de grande importância, em especial no contexto do Brasil, cujo interesse pelos terminais tem se provado grande.

O cálculo da frequência dos acidentes, entretanto, é uma etapa cuja metodologia ainda não está bem estabelecida para as indústrias de GNL. De uma forma geral, a frequência pode ser calculada através de bancos de dados “genéricos” de falhas de equipamentos, referentes a indústrias em geral, ou dados “específicos”, provenientes da planta estudada (KAPLAN, 1983). Entretanto, no caso de um terminal de GNL, o uso exclusivo de um destes tipos de dados no cálculo da frequência de um evento não fornece resultados realistas, pois os dados “genéricos” são geralmente obtidos em condições diferentes das da indústria de GNL e os dados “específicos” são escassos devido ao pouco tempo de existência da indústria de GNL (YUN, 2007, 2008).

Neste contexto surge a necessidade de aplicar a análise Bayesiana para o cálculo de frequências de acidentes em terminais de GNL. Baseada no teorema da Bayes, esta análise consiste na utilização de informações disponíveis, chamadas evidências, em uma função chamada verossimilhança, para atualizar um conhecimento inicial sobre a distribuição de um parâmetro de interesse – distribuição a priori. Esta atualização resulta em uma distribuição a posteriori do parâmetro estudado (KELLY; SMITH, 2011). A análise Bayesiana permite, assim, o uso de dados “genéricos” e “específicos”, além de possibilitar o uso de fontes como dados empíricos (quantidade de falhas por tempo) juntamente com opiniões de especialistas (estimativas das taxas de falha) (DROGUETT; MOSLEH, 2006).

Yun (2007, 2008) utilizou a análise Bayesiana para cálculo de frequência em um terminal de GNL, desenvolvendo o que chamou de Metodologia LOPA³ Bayesiana. Ele afirma que, a partir dessa metodologia, é possível “produzir um dado de falha atualizado usando a informação a priori proveniente de dados ‘genéricos’ de outras indústrias e a verossimilhança proveniente de dados ‘específicos’ do GNL”. A distribuição a posteriori,

²Nas próximas referências ao assunto no presente texto, o termo “Análise Quantitativa de Risco” será substituído pela sigla AQR.

³ LOPA, *Layer Of Protection Analysis*, é um método simplificado de análise de risco que considera camadas de proteção independentes e suas probabilidades de falha (CCPS, 2001).

então, reflete a estabilidade estatística dos dados “genéricos” e a condições específicas da planta de GNL.

Esta metodologia, entretanto, possui uma falha clara: ela trata os dados, provenientes de plantas com diferentes condições de operação, como constituintes de uma população homogênea. As incertezas provenientes da variabilidade de fonte para fonte são ignoradas, o que gera uma distribuição a posteriori estreita, ou seja, subestima-se o nível de incerteza (SIU; KELLY, 1998). Por essas razões, a metodologia aplicada por Yun (2007, 2008) para a determinação de frequências dos acidentes em um terminal de GNL é inapropriada quando aplicada para contextos com escassez de dados e o uso de fontes alternativas de informação.

Kaplan (1983) introduziu pela primeira vez no contexto de análise de risco a metodologia de a Análise Bayesiana em Dois Estágios. O uso desta metodologia corrige o erro da consideração da homogeneidade da população, pois possui um estágio de análise não-homogênea, onde é calculada a variabilidade populacional do parâmetro de interesse – como a taxa de falha, por exemplo – inerente à população dos dados.

No primeiro estágio da Análise Bayesiana em Dois Estágios são utilizados dados “genéricos” de bancos de dados e opiniões de especialistas. Estes dados são normalmente obtidos em diferentes condições de operação do equipamento, de forma que a população resultante é não-homogênea em relação ao parâmetro de interesse. Nesta etapa, portanto, é realizada uma análise Bayesiana não-homogênea, de forma a avaliar a variabilidade populacional desse parâmetro. A distribuição a posteriori do primeiro estágio constitui um conhecimento da taxa de falha do equipamento antes de obter-se o dado específico do terminal estudado. Ela entra, portanto, como a distribuição a priori no segundo estágio da análise, onde esta distribuição será atualizada a partir dos dados específicos.

Por permitir o uso de dados empíricos e de opiniões de especialistas, reconhecendo a não-homogeneidade entre eles, e o uso de dados “genéricos” e “específicos”, a Análise Bayesiana em Dois Estágios é o método mais adequado a ser utilizada para cálculo de frequência de acidentes em um terminal de GNL. O cálculo das frequências a partir de outra metodologia poderia levar a uma subestimação dos valores, gerando um erro expressivo no cálculo dos riscos.

1.2 Objetivos

i) Objetivo Geral

O principal objetivo do presente trabalho é desenvolver uma metodologia de Análise Quantitativa de Risco para terminais *offshore* de Gás Natural Liquefeito fazendo uso da Análise Bayesiana em Dois Estágios para cálculo de frequência dos acidentes.

ii) Objetivos Específicos

- Contextualizar a metodologia geral de Análise Quantitativa de Risco na indústria do Gás Natural Liquefeito, através da revisão da literatura e das normas e manuais referentes à AQR e ao Gás Natural Liquefeito e seus terminais;
- Desenvolver a Metodologia Bayesiana de AQR para Terminais Offshore de GNL, através da revisão da literatura de Análise Bayesiana em Dois Estágios e da análise da problemática do cálculo de frequências para indústria de GNL;
- Aplicar a metodologia desenvolvida (limitando-se ao primeiro estágio da análise bayesiana) em um hipotético terminal offshore de GNL localizado no Porto de Suape⁴.

Para isso, objetivou-se:

- Estudar o processo de armazenamento e regaseificação offshore de GNL, de modo a ser possível a construção de um fluxograma de processo;
- Realizar uma Análise Preliminar de Perigo com base no fluxograma de processo do terminal offshore de GNL, através dos quais são identificados os possíveis cenários acidentais e elencados de acordo com a severidade de suas consequências;
- Avaliar quantitativamente as consequências de um acidente em um terminal offshore de GNL localizado no Porto de Suape;
- Avaliar as frequências dos cenários acidentais estudados, a partir de bancos de dados genéricos, utilizando a metodologia de variabilidade populacional – primeiro estágio da análise Bayesiana em Dois Estágios;

⁴ O Complexo Industrial Portuário de Suape dispõe atualmente de mais de cem empresas instaladas e outras trinta e cinco em fase de instalação. Optou-se por Suape devido ao fato de que tal terminal de GNL poderia atender à demanda de Pernambuco, proveniente, por exemplo, da Refinaria Abreu e Lima e do estaleiro Atlântico Sul, além dos pólos farmacêutico e petroquímico, entre outros.

- Calcular os riscos individuais gerados pelos acidentes considerados, avaliando-os de acordo com a norma CETESB P4.261.

1.3 Estrutura da Dissertação

Para permitir um maior entendimento sobre o tema, o presente texto está esquematizado da seguinte forma:

- São discutidos e apresentados, no segundo capítulo, conceitos sobre o gás natural e o gás natural liquefeito, assim como os perigos gerados por um vazamento de GNL;
- É apresentada a metodologia geral de uma Análise Quantitativa de Risco a partir da norma CETESB P4.261 utilizada no Brasil e demais manuais de realização de AQR, com a descrição das etapas e foco na aplicação em um terminal de GNL. O assunto é tema do terceiro capítulo;
- O quarto capítulo consiste de conceitos básicos sobre o teorema de Bayes e análise Bayesiana homogênea e não-homogênea;
- A metodologia desenvolvida para cálculo das frequências de acidentes em terminais offshore de GNL é detalhada no quinto capítulo;
- O sexto capítulo, finalmente, apresenta a aplicação da metodologia, desde a análise de consequências até o cálculo do risco final, em um terminal offshore de GNL hipotético localizado no Porto de Suape;
- O sétimo capítulo apresenta as conclusões gerais do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2: O Gás Natural Liquefeito

O aumento do número de terminais de GNL é reflexo da valorização e do crescimento do uso de gás natural. Este capítulo apresenta dados sobre o uso do gás natural como fonte de energia, conceitos sobre Gás Natural Liquefeito e os terminais de armazenamento, de regaseificação e aborda os perigos de um vazamento de GNL.

Das fontes de energia compostas de hidrocarbonetos, o gás natural é o mais limpo. É composto basicamente de metano, podendo também apresentar pequenas frações de etano, propano, butano, gás carbônico, nitrogênio, água, metanol e outros. Em seu estado bruto, não tem cheiro e é mais leve que o ar (ANEEL, 2008).

Como é composto quase totalmente por metano, a queima do gás natural emite menos gases poluentes que de outros combustíveis fósseis. O estudo sobre gás natural do Plano Nacional de Energia 2030 registra que o volume de CO₂ lançado na atmosfera pode ser entre 20% e 23% inferior àquele produzido pela geração a partir do óleo combustível e entre 40% e 50% inferior aos casos de geração a partir de combustíveis sólidos, como o carvão.

Durante muito tempo o gás natural foi visto como um subproduto pouco desejável da exploração de petróleo. Uma parte do gás natural encontrado associado ao óleo era utilizada na produção de energia para os equipamentos da exploração do petróleo, enquanto o restante era queimado. Ainda hoje companhias de petróleo queimam grande parte do gás natural, principalmente pela dificuldade de estocagem e transporte do produto. (KELKAR, 2008)

Entretanto, a partir dos anos 80, o consumo entrou em expansão e o gás natural tornou-se a fonte de energia de origem fóssil a mais crescer no mundo. Segundo o estudo Key World Energy Statistics, publicado pela International Energy Agency (IEA) em 2008, o gás natural encontrava-se, em 2006, na terceira posição na matriz energética mundial, como mostrado na Figura 2.1. No que se refere especificamente à produção de energia elétrica, entre os anos de 1973 e 2007 o gás natural saltou do quarto para o segundo lugar, superado apenas pelo carvão, conforme Figura 2.2. Em novembro de 2008, segundo o

Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), existiam 85 usinas termelétricas abastecidas a gás natural em operação no Brasil, com um total instalado de 11 mil MW (megawatts) – ou pouco mais de 10% da potência total instalada no país, de 103 mil MW.

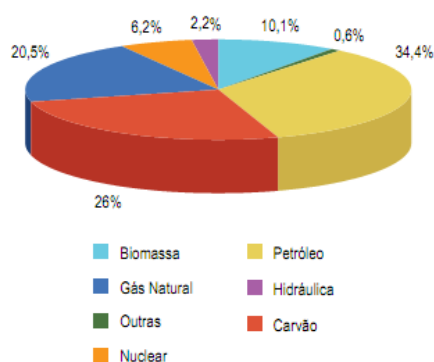


Figura 2.1: Participação do gás natural na oferta primária de energia no mundo em 2006

Fonte: IEA (2008)

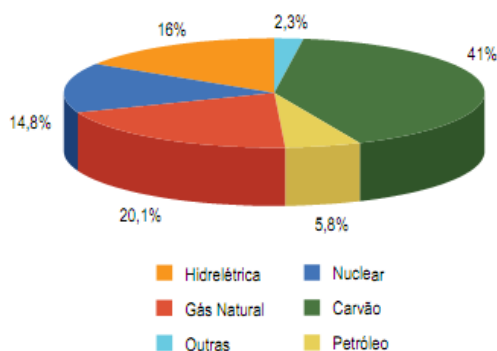


Figura 1.2: Participação do gás natural na produção mundial de energia elétrica em 2006

Fonte: IEA (2008)

A quantidade de reservas provadas de gás natural também vem sofrendo crescimento ao longo dos anos. De acordo com o Relatório de Junho de 2010 da empresa BP - *BP Statistical Review of World Energy*, em 1989 existia um total de reservas provadas de gás natural de 122,40 trilhões de metros cúbicos, enquanto em 2009 o valor era de 187,49 trilhões de metros cúbicos. No Brasil a quantidade de reservas provadas sofreu grande crescimento depois da década de 80, em particular pela descoberta das reservas na Bacia de Campos, conforme Figura 2.2.

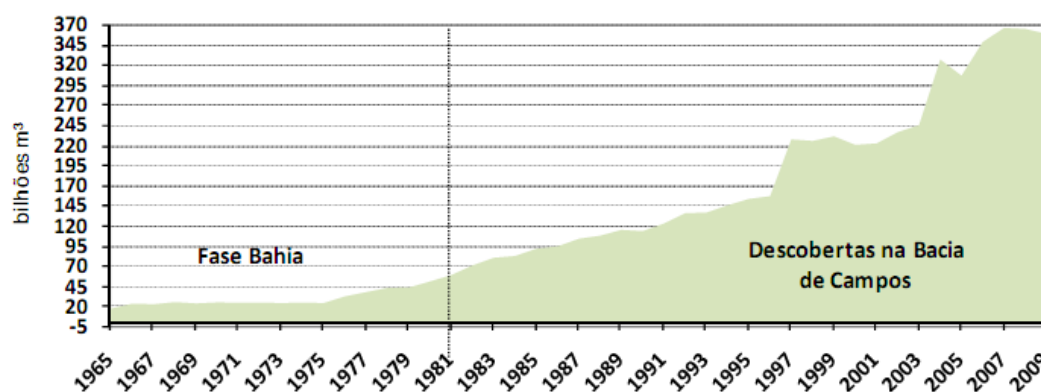


Figura 2.2: Reservas provada de gás natural no Brasil

Fonte: ANP (2010)

Diante da valorização do uso de gás natural e crescimento de descobertas de reservas no mundo, muito se estudado sobre as diversas alternativas para estocagem e transporte do gás natural, principais entraves para crescimento de seu uso.

Atualmente, existem quatro opções tecnológicas disseminadas no mercado: (a) reunião e transmissão de gás por gasodutos; (b) gás em estado transitório por redução de volume como Gás Natural Liquefeito (GNL), Gás Natural Comprimido (GNC) e Hidrato de Gás Natural (HGN); (c) conversão em outros produtos (*Gas-to-Liquid* - GTL); e (d) conversão para outra forma de energia como energia elétrica e transmissão por cabo submarino para a costa terrestre. Desses métodos os mais utilizados atualmente são os gasodutos e o Gás Natural Liquefeito.

2.1 Gás Natural Liquefeito

O Gás Natural Liquefeito provém da liquefação do gás natural, obtida através de seu resfriamento a aproximadamente -162°C e pressão atmosférica. A liquefação reduz o volume do gás em aproximadamente 600 vezes, tornando-se uma forma econômica de estocagem e transporte.

A primeira planta de liquefação do gás natural em escala comercial a entrar em operação foi em Cleveland, Ohio. Em 1959 houve o primeiro transporte de GNL através de navios, pelo navio Methane Pioneer. Com a viabilidade de transporte através de navios o Reino Unido começou a importar GNL da Argélia, tornando-se o primeiro importador de GNL

e a Argélia o primeiro exportador. Com o sucesso da operação no Reino Unido, o conceito foi difundindo-se pelo mundo, com a construção de várias plantas marítimas de liquefação e terminais de importação (ANP, 2008).

Existem grandes reservas de gás natural em locais em que não há mercado consumidor significativo, como no norte e oeste da África, América do Sul, Caribe, Indonésia, Malásia, etc. Com a tecnologia do GNL, o gás natural pode suprir locais onde há grande mercado consumidor e insuficiente produção, como Japão, Coréia, Estados Unidos e Europa ocidental. O gráfico na Figura 2.3 mostra que, à medida que cresce a distância entre o produtor e o consumidor do gás natural, o GNL tem vantagens econômicas sobre o uso de gasoduto.

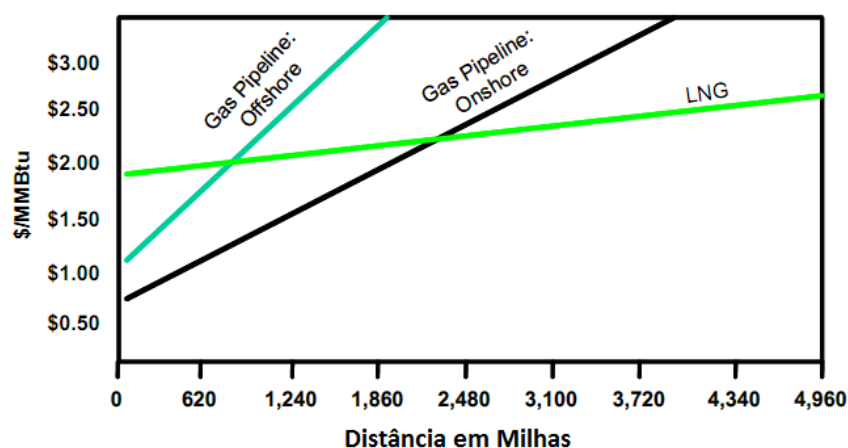


Figura 2.3: Custo do transporte de gás natural pela distância

Fonte: CEE (2007)

A cadeia de valor do GNL consiste de quatro etapas interdependentes, ilustradas na Figura 2.5: exploração e produção, liquefação, transporte e estocagem e regaseificação para envio ao consumidor final.

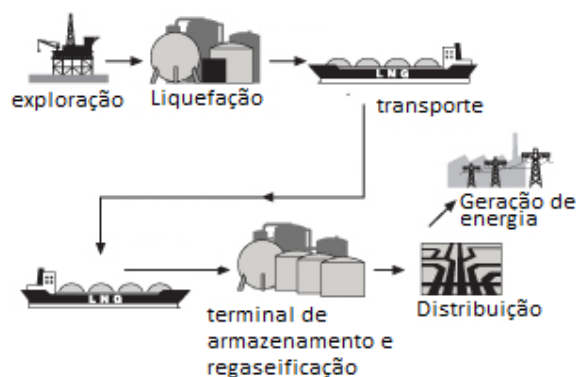


Figura 2.5: Etapas da cadeia de GNL

Fonte: ANP (2010)

Na planta de liquefação de GNL é feito um pré-tratamento para remoção de impurezas, de forma a evitar que haja formação de sólidos quando for feito o resfriamento de -162°C . A Figura 2.6 ilustra a composição típica do gás natural bruto e depois do tratamento, já liquefeito. Após o tratamento o GNL é composto praticamente apenas de metano, sendo seu uso ainda menos poluente que do gás natural.

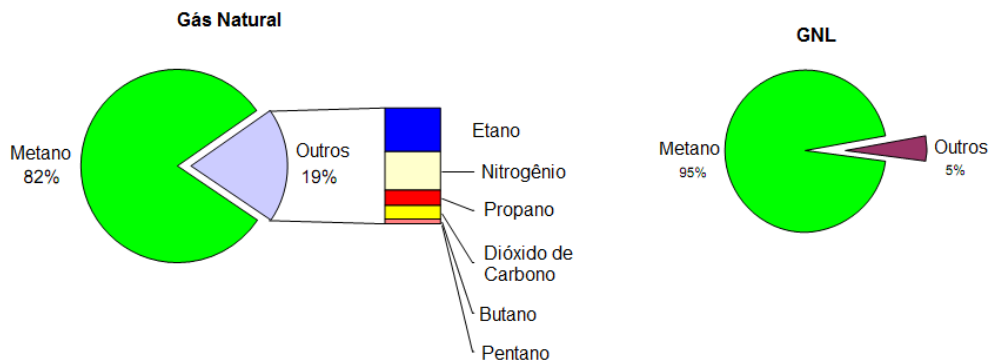


Figura 2.6: Composição do gás natural e do GNL

Fonte: CEE (2007)

O transporte do GNL é feito através de navios ou de caminhões-tanque, e ele segue aos terminais de armazenamento e regaseificação, para ser encaminhado ao destino final através de gasodutos.

Os terminais de armazenamento e regaseificação podem ser onshore ou offshore.

Os dois tipos de terminal são constituídos de um píer ou terminal de recebimento, instalações de estocagem de GNL, unidade de regaseificação e instalações pra exportação do gás natural regaseificado ao destino final. O esquema geral do fluxograma de processo dos terminais de GNL está ilustrado na Figura 2.7. O GNL é recebido do navio através de braços de descarregamento e segue para os tanques de armazenamento. Bombas de baixa pressão imersas no tanque (primeiro estágio) levam o GNL a um recondensador, de onde o líquido segue para os vaporizadores através de uma bomba de alta pressão (segundo estágio), e depois para a tubulação de envio final. O vapor formado nos tanques é comprimido para ser adicionado à corrente de GNL regaseificado ou retorna ao navio, de forma a balancear a pressão entre os tanques do navio e do terminal.

Existem vários tipos de vaporizadores de GNL. Os mais utilizados em terminais onshore são os tipos ORV – *Open Rack Vaporisers* e SCV – *Submerged Combustion Vaporisers* (YANG, 2004). Os do tipo ORV consistem de uma série de painéis paralelos compostos por tubagens finas. O funcionamento deles é muito simples, não exigindo partes móveis ou processo de combustão (REN – Website). Os do tipo SCV são utilizados normalmente como reserva para os ORV. Eles utilizam água quente aquecida por uma câmara de combustão imersa que vaporiza o GNL. Os gás utilizado para a combustão vem do boil-off do GNL, podendo utilizar também gases mais pesados extraídos do GNL no terminal (LIAO, 2007).

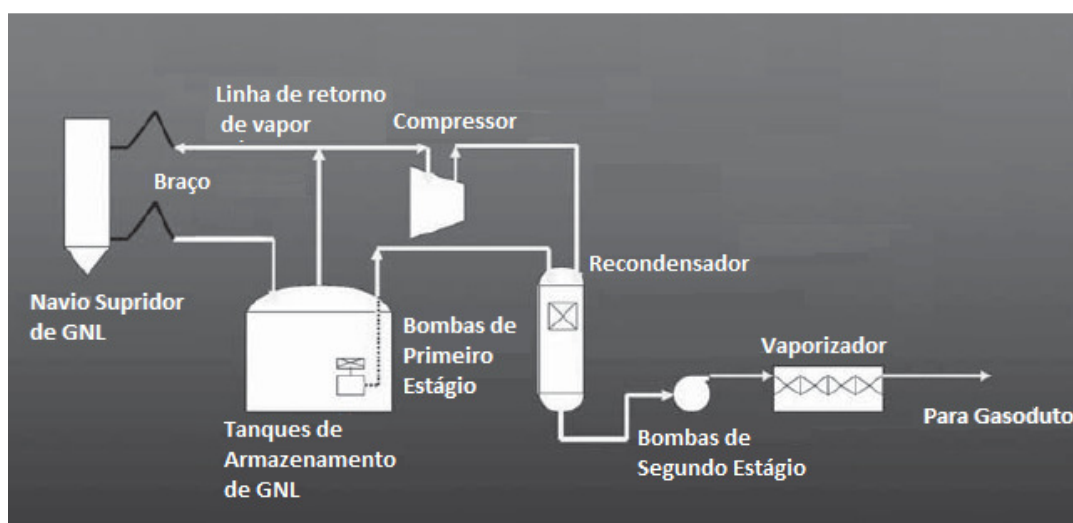


Figura 2.7: Esquema básico do processo de recebimento, estocagem e regaseificação de GNL nos terminais onshore

Fonte: Adaptado de DURR (2004) apud Woodward e Pitblado (2010)

Os terminais offshore podem exibir duas configurações (SPITZENBERGER, 2006):

1. Gravity Based System (GBS): estrutura de concreto com base no fundo do mar que apoia o terminal no topo;
2. Floating Storage and Regasification Unit (FSRU): navios com tanques de GNL e unidade de regaseificação onboard.

No Brasil existem dois terminais de regaseificação de GNL implantados, ambos offshore do tipo FSRU, que entraram em funcionamento em 2009. O primeiro deles fica Pecém-CE, que usou um píer existente e se conectou ao Gasfor – Gasoduto Recife-Fortaleza,

e outro na Baía de Guanabara – RJ, onde um píer foi construído e conectado à malha de gasodutos da REDUC.

O FSRU da Petrobrás instalado em Pecém, chamado Golar Spirit (Figura 2.8), possui uma capacidade de estocagem de 129 mil metros cúbicos de GNL. Este navio foi o primeiro navio de transporte de GNL construído no Japão, em 1981, e foi posteriormente convertido em um FSRU. O FSRU instalado na Baía da Guanabara (Golar Winter) tem capacidade de 138 mil metros cúbicos. Foi construído em 2004 e foi convertido em FSRU em 2009 (BLACKWELL; SKAAR, 2009).



Figura 2.8: O Golar Spirit (à direita) e o navio supridor de GNL atracados na Baía de Guanabara

Fonte: Blackwell e Skaar (2009)

No ano de 2010 o Governo Federal anunciou que deve instalar mais um terminal offshore, na Baía de Todos os Santos (TRBA). De acordo com a Petrobras, o novo terminal terá capacidade para regaseificar 14 milhões de m^3 /dia. As obras devem começar em 2012 e serão concluídas em 2013. Quando o TRBA entrar em operação, o Brasil terá capacidade de regaseificar 35 milhões m^3 /dia, volume maior que os 31 milhões m^3 /dia de gás natural importados da Bolívia.

A escolha do Brasil e de vários outros países pelos terminais offshore reside nas vantagens que estes apresentam, em especial os FSRUs, que oferecem maiores atrativos

financeiros e flexibilidade. Os FSRUs custam bem menos que terminais de mesmo tamanho onshore e possuem rápido retorno de capital. O tempo de construção é reduzido se foram aproveitados navios de transporte de GNL já existentes, o que ocorre na maioria dos casos. Além disso, os FSRUs, dependendo de seu design e configuração, podem ser movidos de um centro de demanda para outro, tornando-se uma boa opção para países cuja demanda é sazonal (BLACKWELL; SKAAR, 2009).

Em 2004, havia apenas dois projetos de FSRU no mundo. Em 2009, sete projetos de FSRUs já estavam operando, outros quatro já estavam formalizados e vários outros tinham sido propostos, conforme ilustrado pela Figura 2.9.



Figura 2.9: Projetos de FSRUs em operação, sancionados e propostos no mundo

Fonte: Blackwell (2009)

2.2 Perigos associados ao GNL

Os perigos associados ao GNL são devido à própria natureza do gás natural, inflamável sob certas condições. Além disso, pessoas que entrarem em contato com GNL podem sofrer danos aos tecidos, por sua condição criogênica. As possíveis consequências de um vazamento de GNL estão ilustradas na **Error! Reference source not found.**2.10, e descritas abaixo.

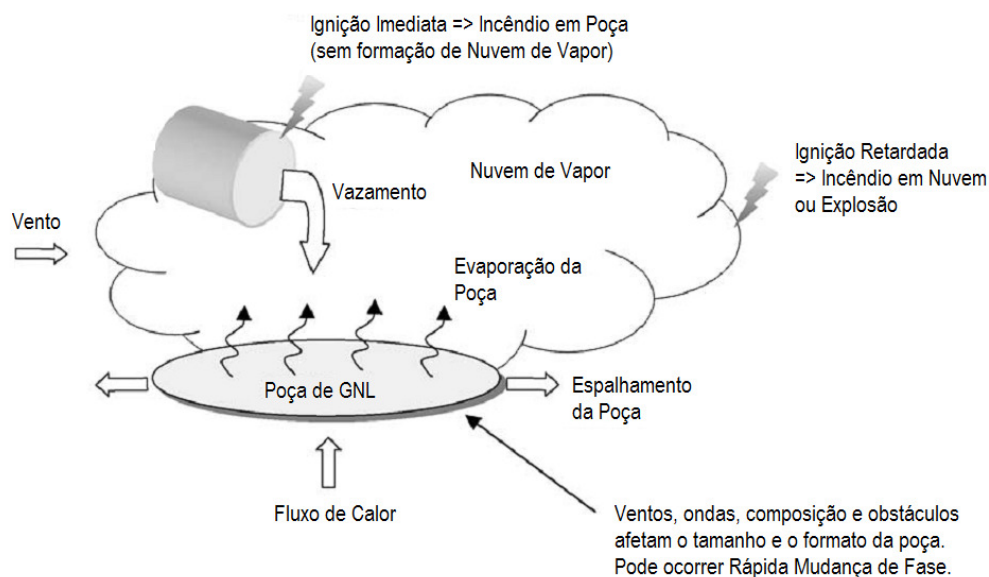


Figura 2.10: Possíveis consequências de um derramamento de GNL

Fonte: Adaptado de Luketa-Hanlin (2005)

i) Contato com líquido criogênico

Se há contato direto com líquido criogênico, podem ocorrer ulcerações na pele. Os líquidos criogênicos possuem baixa viscosidade, podendo penetrar através dos tecidos das roupas mais rapidamente que líquidos como a água. A inalação do vapor por período prolongado pode causar danos aos pulmões. (BERNATIK; SENOVSKY; PITT, 2010)

ii) Incêndio em Poça

No vazamento de GNL há formação de uma poça, que se espalha e sofre evaporação simultaneamente. O formato e o tamanho da poça dependem de variáveis como vento, ondas e correntes (no caso de vazamento sobre água), existência de obstáculos, etc. A maneira como as ondas e as correntes afetam a poça ainda é desconhecida.

A composição do GNL também pode afetar a poça. A presença de hidrocarbonetos mais pesados como etano e propano tende a aumentar a taxa de evaporação, pois há maior possibilidade de colapso no filme de evaporação, resultando em uma poça menor (LUKETA-HANLIN, 2005).

Se há ignição imediata do GNL ocorre o incêndio em poça. De acordo com experimentos de incêndio em poça de GNL sobre água e sobre terra revisados por Luketa-

Hanlin (2005), a maior diferença entre os dois é a altura da chama e a taxa de queima, ambos maiores em água que em terra, devido ao maior fluxo de calor proveniente da água.

iii) Incêndio em nuvem

No momento de vazamento do GNL ocorre vaporização imediata de parte do líquido. A nuvem de vapor formada por essa vaporização cresce substancialmente no caso de não ocorrer ignição imediata, com a vaporização da poça de GNL formada.

De acordo com o estudo de Luketa-Hanlin (2005), que fez uma revisão dos experimentos de vazamento de GNL já realizados, no caso de vazamento de GNL não confinado em água o GNL vaporiza a uma alta taxa, mantida constante pelo alto fluxo de calor proveniente da água. A poça formada por vazamento em terra, ao contrário, possui taxa de evaporação alta no início e vai decaindo com o tempo. Se há derramamento de GNL confinado em águas calmas pode haver formação de gelo, causando diminuição na taxa de fluxo de calor e tornando-a similar à do derramamento em terra.

A evaporação da poça resulta em uma nuvem de baixa altitude e visível, apesar do vapor de GNL não ter cor, por causa do vapor de água condensado na nuvem.

A evaporação de todos os componentes do GNL não ocorre de forma simultânea. A evaporação do metano é preferencial, e, perto do fim da evaporação da poça, os hidrocarbonetos mais pesados sofrem evaporação (LUKETA-HANLIN, 2005).

Se a nuvem de vapor estiver dentro dos limites de inflamabilidade do gás natural - entre 5 e 15% em volume- pode ocorrer incêndio em nuvem em caso de ignição. Abaixo de 5% em volume de gás natural não há suficiente combustível no ar, e acima de 15% há muito combustível e pouco oxigênio para queima. O fogo do incêndio em nuvem pode propagar-se de volta à fonte e causar um incêndio em poça retardado (VANEM et al., 2007).

iv) Rápida mudança de fase

A Rápida Mudança de Fase (RPT, do inglês Rapid Phase Transition) é um fenômeno que ocorre em incidentes em que o GNL vaporiza violentamente quando em contato com a água causando o que se chama de explosão física ou explosão fria (IOMOSAIC, 2006).

A teoria prevalecente para que ocorra a RPT é que imediatamente após o derramamento de GNL sobre a água ocorre a evaporação em filme e, devido a possíveis instabilidades, o filme de vapor sofre colapso áreas localizadas, resultando em contato

líquido/líquido. Esse contato resulta em uma rápida evaporação do GNL, surgindo uma onda de pressão para alcançar a rápida expansão(LUKETA-HANLIN, 2005).

De forma geral, o RPT tende a gerar ondas de pressão de baixa intensidade, com energia insuficiente para apresenta impactos de longa distância (PITBLADO, 2004). Por esse motivo e pela dificuldade em modelar o RPT, em muitos estudos de consequência do GNL ele não é considerado.

Além desses perigos o GNL pode causar asfixia, pois o vapor desloca o ar, e explosão, pouco provável porque nos terminais não há normalmente espaço de confinamento do vapor.

Podem ser encontrados na literatura alguns trabalhos experimentais e teóricos sobre como o Gás Natural Liquefeito se comporta após um vazamento. Um deles é o já citado de Luketa-Hanlin (2005), que fez uma revisão de trabalhos experimentais de vazamento de GNL já existentes. Entre outros, destacam-se os trabalhos de Cormier et al. (2008), que utilizaram fluidodinâmica computacional para modelagem da dispersão de uma nuvem de GNL, destacando quais as variáveis que mais afetam a distância do local de vazamento até o limite inferior de inflamabilidade da nuvem; Raj (2006), que publicou uma revisão dos resultados experimentais de trabalhos anteriores de cenários de fogo provenientes do vazamento de GNL, identificando importantes lacunas ainda não estudadas; Johnson e Cornwell (2006), que verificaram se os modelos utilizados para simulação de GLP e gasolina em água podem ser aplicados para o GNL.

Capítulo 3: Análise Quantitativa de Risco e Aplicação em Terminais Offshore de GNL

A metodologia de Análise Quantitativa de Risco tem suas etapas bastante consolidadas na literatura. Neste capítulo cada etapa de uma AQR é apresentada, seguindo manuais conhecidos e a norma da CETESB (2003). Cada etapa é contextualizada para aplicação nos terminais offshore de GNL.

No entanto, no caso dos terminais de GNL, a metodologia convencional deve ser adaptada no que se refere ao cálculo das frequências dos acidentes. Portanto, apesar de a metodologia geral de AQR ser apresentada neste capítulo, o cálculo de frequências é explicitado em capítulo à parte – Capítulo 5.

A indústria de GNL apresenta riscos inerentes a indústrias que lidam com produtos inflamáveis (LUKETA-HANLIN, 2005), como explicado na Seção 2.2 do Capítulo 2. Assim, qualquer instalação de GNL deve passar por uma Análise Quantitativa de Risco - AQR, de forma a identificar os riscos que a população pode sofrer em caso de um acidente com vazamento de GNL.

Os registros históricos de acidentes em instalações de GNL mostram que essa indústria tem um baixo índice de acidentes graves. Os principais acidentes registrados estão listados abaixo (The California Energy Commission – *website*):

Explosões e incêndios

Outubro de 1944, Cleveland, Ohio – Na planta de “peak-shaving” de Cleveland⁵ um tanque falhou e derramou seu conteúdo nas ruas e no sistema de esgoto. A explosão e o incêndio resultantes mataram 128 pessoas. O tanque fora construído com uma liga de aço que possuía baixo teor de níquel, o que fez com que a liga ficasse frágil ao se expor à temperatura criogênica do GNL.

⁵ Uma planta “peak-shaving” é uma planta que liquefaz gás natural quando a demanda de gás é baixa e regaseifica quando a demanda é alta. Esta planta foi a primeira planta a produzir ou utilizar GNL no mundo.

1964 e 1965 – Navio Methane Progress⁶ – Durante um carregamento de GNL em Arzeu, Argélia, um relâmpago atingiu o tubo de suspiro do Methane Progress e inflamou o vapor que estava sendo liberado. Um evento similar aconteceu no início do ano 1965 enquanto uma embarcação navegava pouco após deixar Arzew. Em ambos os casos a chama extinguiu-se rapidamente por meio de uma purga com nitrogênio através de uma conexão para o *riser*.

1969, Portland, Oregon – Uma explosão ocorreu em um tanque de GNL em construção. Nunca havia sido introduzido GNL no tanque. A causa do acidente foi atribuída à remoção acidental dos bloqueios dos dutos de gás natural que estavam conectados ao tanque, o que levou a um fluxo de gás natural para dentro do tanque enquanto este ainda estava em construção.

Janeiro de 1972, Montreal East, Quebec, Canada – Um fluxo de retorno de gás natural a partir do compressor para a linha de nitrogênio ocorreu durante operações de descongelamento em uma planta de liquefação e “peak-shaving” de GNL. As válvulas do nitrogênio não foram fechadas após o término da operação, o que ocasionou uma superpressurização do compressor e o gás natural adentrou a sala de controle (onde fumar era permitido aos operadores) através do cabeçalho de nitrogênio. Uma explosão ocorreu quando um operador tentou acender um cigarro.

Fevereiro de 1973, Staten Island, New York – Um incêndio foi iniciado durante o reparo do interior de um tanque de armazenamento vazio. O resultante aumento de pressão dentro do tanque ocorreu tão rapidamente que a cúpula de concreto no tanque levantou-se e depois colapsou para dentro do tanque, matando 37 trabalhadores que lá estavam.

Outubro de 1979, Cove Point, Maryland – Um vazamento de gás natural causou uma explosão, matando um empregado e ferindo seriamente um outro trabalhador, e causando cerca de 3 milhões de dólares de prejuízo em danos.

Abril de 1983, Bontang, Indonésia – Uma ruptura em uma planta de GNL ocorreu como o resultado da superpressurização do trocador de calor, causado por uma válvula fechada em uma linha de descarga. O trocador havia sido projetado para operar a 25,5 psig e, quando a pressão chegou a 500 psig, o trocador falhou e a explosão aconteceu.

⁶ O Methane Progress foi um dos dois primeiros navios a transportar GNL, junto com o Methane Princess.

Agosto de 1987, Local de Testes de Nevada, Mercury, Nevada – Uma ignição acidental de uma nuvem de GNL ocorreu no Local de Testes do Departamento de Energia dos Estados Unidos durante testes em larga escala envolvendo derramamentos de GNL.

Junho de 2004, Trinidad, Tobago – Trabalhadores foram evacuados depois que uma turbina de gás no trem 3 da planta Atlantic explodiu.

Julho de 2004, Ghislenghien, Bélgica – Um duto que transportava gás natural do porto belga de Zeebrugge ao nordeste da França explodiu, resultando em 23 fatalidades registradas. A causa do incidente ainda está sob investigação, mas aparentemente um cano foi acidentalmente danificado.

Março de 2005, District Heights, Maryland – Um estudo patrocinado por uma companhia de gás de Washington, publicada em julho de 2005, apontou como causa de uma explosão diferenças moleculares sutis no GNL que era usado desde agosto de 2003.

Derramamentos e vazamentos

1965, Derramamento do Methane Princess – Braços de descarga de GNL foram desconectados prematuramente antes que as linhas houvessem sido completamente secas, fazendo com que o GNL passasse por uma válvula parcialmente aberta para uma bandeja de gotejamento de aço inoxidável localizada abaixo dos braços.

Maio de 1965, Derramamento do Jules Verne – O derramamento de GNL em Arzew, Argélia, foi causado pelo transbordamento de um tanque de carga

1971, La Spezia, Itália – Este acidente foi causado por “rollover”, em que são formadas duas camadas de GNL com diferentes densidades e energia térmica. A mistura repentina dessas duas camadas resultou na liberação de grandes volumes de vapor. Neste caso, cerca de 2000 toneladas de GNL vaporizado foram liberados pelas válvulas de segurança dos tanques e pelos suspiros durante o período de algumas horas, danificando o teto do tanque.

Julho de 1974, Derramamento de Massachusetts Barge – Após uma falha de energia e o fechamento automático das válvulas da linha líquida principal, 40 galões de GNL vazaram enquanto eram carregados em uma embarcação. O GNL vazou através de uma válvula-globo de purga de nitrogênio de uma polegada.

Setembro de 1977, Derramamento de Aquarius – Durante o preenchimento de um tanque de carga em Botang, GNL transbordou através da suspiro do tanque. O incidente

pode ter sido causado por dificuldades sistema de medição do nível do líquido. O alarme de alto nível havia sido posto no modo *override* para evitar alarmes falsos.

Março de 1978, Das Island, Emirados Árabes Unidos – Um incidente ocorreu devido à falha da conexão de uma tubulação de fundo de um tanque de GNL. O tanque possuía uma parede dupla (uma parede interna com 9% de níquel e uma parede externa de aço carbono). O vapor formou uma nuvem mais pesada que o ar que não sofreu ignição.

Abril de 1979, Derramamento de Mostafa Ben Bouliad – Enquanto descarregava-se uma carga em Cove Point, Maryland, uma válvula de checagem na tubulação da embarcação falhou, liberando uma pequena quantia de GNL, o que resultou em pequenas fraturas no forro do convés.

Abril de 1979, Derramamento de Pollenger – Enquanto a embarcação estava descarregando GNL em um terminal em Everett, Massachusetts, ocorreu um vazamento de GNL a partir de uma válvula aparentemente fraturando uma das placas do tanque.

No Brasil, o tipo de instalação de GNL que mais cresce são os terminais offshore de armazenamento e regaseificação. É muito importante, assim, a aplicação de uma correta metodologia de AQR para esses terminais.

O desenvolvimento do conceito de risco e da metodologia de uma Análise de Risco teve como marco inicial, de acordo com Camacho (2004), o relatório Wash 1400, do início da década de 70, voltado aos riscos devidos às operações de plantas nucleares. Na mesma década, teve origem relatório Canvey, oriundo de estudo abrangente de instalações não-nucleares do Reino Unido. Nos anos 80, outro estudo de avaliação de perigos envolvendo instalações não-nucleares em Rinjmond, no delta do Reno, deu origem ao relatório Rinjmond.

A etapa fundamental que consagrou a metodologia de análise de risco e ampliou seu uso para avaliação dos riscos relacionados à segurança das plantas de processo em geral, ainda de acordo com Camanho (2004), foi o guia de procedimentos desenvolvido pelo Instituto Americano de Engenheiros Químicos – AIChE, no início da década de 80.

Atualmente tem-se acesso a diversos manuais para realização de Análise Quantitativa de Riscos. A Organização Holandesa para a Pesquisa Científica Aplicada (TNO) publicou uma série de livros identificados por cores: o *Purple Book* (Procedimentos para Avaliação Quantitativa de Riscos), *Red Book* (Métodos para Determinação e Processamento de

Probabilidades), *Green Book* (Métodos para Determinação dos Danos Possíveis) e *Yellow Book* (Métodos para Cálculo dos Efeitos Físicos). A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) publicou, em 2000, o Manual de Orientação para a Elaboração de Estudos de Análise de Riscos.

De acordo com a AIChE (2000), risco é uma combinação de evento, probabilidade e consequências: uma medida de consequências a humanos e ao meio ambiente e de perdas econômicas em termos da probabilidade do acidente e a magnitude das consequências.

A Análise Quantitativa de Risco fornece uma ferramenta de quantificação do risco e análise das estratégias para sua redução.

Em uma Análise Quantitativa de Risco, eventos são definidos como incidentes não desejáveis que se relacionam à liberação de substâncias tóxicas, inflamáveis e/ou explosivas, podendo causar efeitos físicos como uma nuvem tóxica ou uma explosão. A medida dos danos dos efeitos físicos é definida como consequência, e um cenário acidental relaciona determinado evento a seus possíveis efeitos físicos.

Como a aplicação da metodologia desenvolvida nessa dissertação será em um terminal no Brasil, a metodologia de AQR explicitada neste capítulo será a da norma CETESB P4.261 (2003), que segue o esquema da Figura 3.1. A descrição de cada etapa, explicitando a aplicação em terminais offshore de GNL, segue nas sub-seções a seguir.

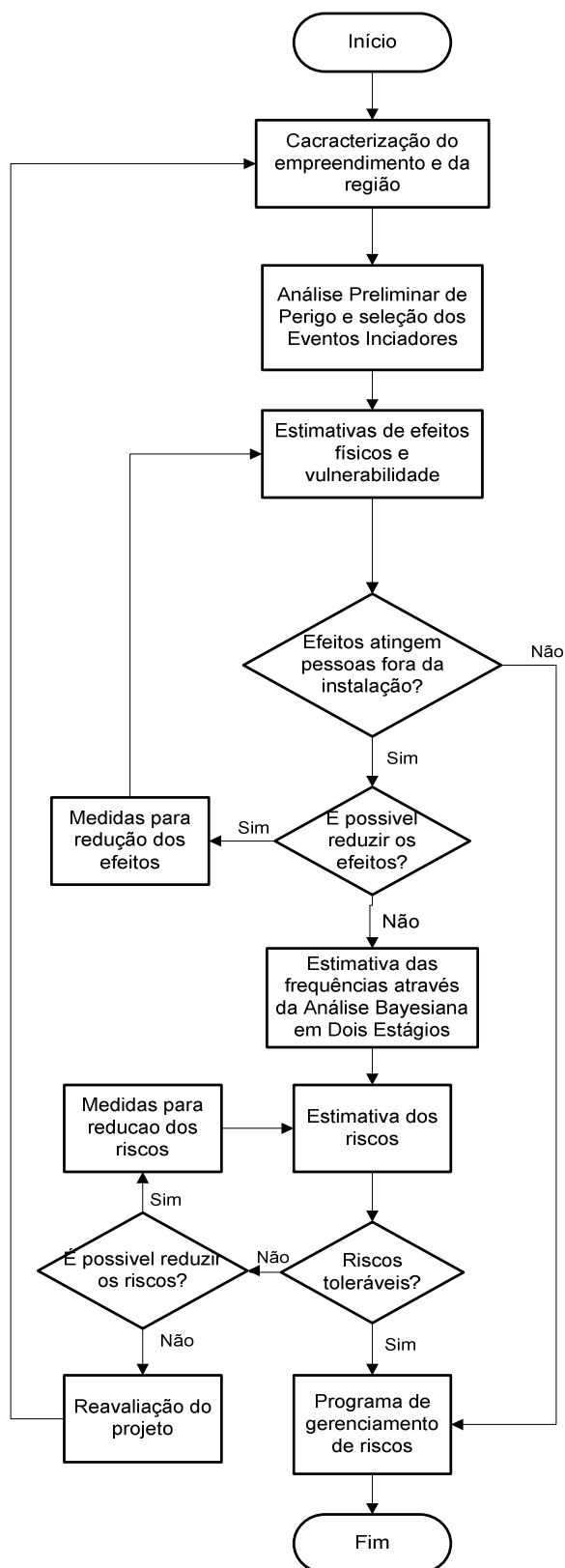


Figura 3.1: Metodologia de Análise Quantitativa de Risco

3.1 Caracterização do empreendimento e da região

O empreendimento a ser analisado deve ser caracterizado em relação à localização e descrição física e geográfica da região, distribuição populacional da região; descrição física e lay-out, em escala, da instalação; características climáticas e meteorológicas da região; substâncias químicas utilizadas identificadas através de nomenclatura oficial e número CAS; descrição do processo e rotinas operacionais; apresentação de plantas baixas das unidades e fluxogramas de processos, de instrumentação e de tubulações; sistemas de proteção e segurança (CETESB, 2003).

As condições atmosféricas e meteorológicas do local são muito importantes para a simulação dos vazamentos e modelagem de evaporação da poça, dispersão da nuvem, etc.

A CETESB (2003) indica que são necessário dados meteorológicos reais do local em estudo, considerando-se, no mínimo, os dados dos últimos três anos, tais como:

- temperatura ambiente, velocidade do vento e umidade relativa do ar: adotar a média para os períodos diurno e noturno;
- categoria de estabilidade atmosférica (Pasquill): adotar aquelas compatíveis com as velocidades de vento para os períodos diurno e noturno, de acordo com a Tabela 3.1;
- direção do vento: adotar pelo menos oito direções com suas respectivas probabilidades de ocorrência.

Tabela 3.1: Categorias de estabilidade Pasquill

Velocidade do Vento (V) a 10 m (m/s)	Período Diurno			Período Noturno	
	Insolação			Nebulosidade	
	Forte	Moderada	Fraca	Parcialmente	Encoberto
$V \leq 2$	A	A – B	B	F	F
$2 < V \leq 3$	A – B	B	C	E	F
$3 < V \leq 5$	B	B – C	C	D	E
$5 < V \leq 6$	C	C – D	D	D	D
$V > 6$	C	D	D	D	D

A – extremamente instável; B – moderadamente instável; C – levemente instável; D – neutra; E – levemente estável; F – moderadamente estável.

Fonte: Adaptado de Gifford (1976) apud CETESB (2003)

3.2 Identificação dos perigos e consolidação dos cenários acidentais

A identificação de perigos é uma etapa qualitativa da análise de risco, e objetiva identificar todos os eventos iniciadores de incidentes, com consolidação dos cenários acidentais e uma hierarquização dos riscos associados.

A Análise Preliminar de Perigo (APP) é uma das técnicas mais comuns de identificação de perigos. Teve origem no programa de segurança militar do Departamento de Defesa dos EUA, e tem por objetivo identificar os perigos presentes numa instalação (CETESB, 2003).

Uma APP deve conter o perigo, a causa associada, os efeitos físicos possíveis, a categoria de severidade e observações e recomendações, de acordo com a CETESB (2003), podendo ainda conter outras informações relevantes. O exemplo de uma tabela de APP está na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Exemplo de tabela de APP

Cenário	Perigo	Trecho	Causas	Efeitos	Categoria de severidade
1	Pequena liberação de Gás Natural Liquefeito	Braço de descarregamento de GNL	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Incêndio em Poça, Incêndio em nuvem	III
2	Grande liberação de Gás Natural Liquefeito	Braço de descarregamento de GNL	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas, ou desconexão do braço por condições climáticas extremas	Incêndio em Poça, Incêndio em nuvem	IV

No caso dos terminais de GNL, os perigos consistem basicamente do vazamento de Gás Natural Liquefeito e do Gás Natural. As causas do vazamento podem ser fissuras ou rupturas das tubulações nas áreas de processo ou mesmo de equipamentos como bombas, vasos ou dos tanques de armazenamento de GNL. Além de acidentes na área de processo, o terminal offshore apresenta outras possíveis fontes de vazamento de GNL: colisão com navio supridor de GNL ou outros navios, sabotagem e causas naturais como maremotos ou condições climáticas extremas (SPITZENBERGER, 2006; KOO et al., 2009). Estes acidentes podem ser agrupados em um único cenário, causando um furo ou ruptura do tanque de GNL.

Os efeitos físicos decorrentes do vazamento dependem da substância liberada e das condições existentes. Para uma liberação de Gás Natural Liquefeito, os efeitos possíveis são um incêndio em poça (adiantado e retardado) e um incêndio em nuvem, enquanto que para a liberação de Gás Natural pode ocorrer um jato de fogo ou o incêndio em nuvem.

Em alguns casos, a liberação de GNL ou Gás Natural poderia resultar em uma explosão da nuvem. No caso da formação da nuvem sobre a água, entretanto, não existem áreas de confinamento para prover condições de explosão à nuvem (PITBLADO, 2004). Assim, para o caso do terminal offshore, a possibilidade de explosão da nuvem pode ser desconsiderada.

A categoria de severidade do cenário corresponde aos danos das possíveis consequências do cenário às pessoas, conforme Tabela 3.3. A severidade aqui é selecionada de forma qualitativa, normalmente com ajuda de especialistas, a partir das condições de operação do processo.

Tabela 3.3: Categorias de severidade

Categoria	Descrição
I Desprezível	Sem lesões, ou no máximo casos de primeiros socorros, sem afastamento.
II Marginal	Lesões leves em empregados e terceiros. Ausência de lesões extramuros.
III Crítica	Lesões de gravidade moderada em pessoas intramuros. Lesões leves em pessoas extramuros.
IV Catastrófica	Provoca morte ou lesões graves em 1 ou mais pessoas intra ou extramuros.

Fonte: Norma Técnica Petrobrás N-2782

Depois de identificados todos os cenários acidentais na Análise Preliminar, devem, ser elencados os cenários que serão estudados detalhadamente nas próximas etapas, constituindo os Eventos Iniciadores. De acordo com a CETESB (2003), a escolha destes cenários deve levar em conta a severidade do dano decorrente da falha identificada. Assim, os Eventos Iniciadores podem ser escolhidos entre os cenários de severidade III e IV, considerando-se as condições de operação como Pressão e Temperatura e o diâmetro e inventário do trecho.

3.3 Estimativa das frequências de ocorrência dos acidentes

A frequência de ocorrência de um cenário acidental é a quantidade de vezes em que ele ocorre por tempo. Normalmente é expressa em base anual, tendo dimensão de ano⁻¹.

Para que a análise de risco seja consistente, é necessário que a estimativa das frequências seja a mais próxima da realidade. Uma estimativa sub ou super-estimada destes valores pode levar a erros grosseiros no cálculo da magnitude dos riscos de determinado acidente para a população.

Para a estimativa da frequência do Evento Iniciador são necessários dados de falhas dos equipamentos ou de fissuras ou rupturas das tubulações. Existem vários bancos de dados que apresentam dados de falhas para indústrias em geral, e na análise de risco de indústrias como refinarias de petróleo ou petroquímicas estes dados pode ser usados diretamente. Entretanto, as condições de operação do terminal de GNL são muito específicas. O uso exclusivo destes bancos de dados, portanto, pode levar a erros significativos na análise.

O uso de dados específicos da indústria de GNL também não é correto para estimar as frequências dos acidentes pois, devido ao tempo curto de existência, os dados não são estatisticamente confiáveis.

Esta etapa da Análise Quantitativa de Riscos de um terminal de GNL deve, assim, seguir uma metodologia diferente da convencional. A metodologia proposta é a Análise Bayesiana em Dois Estágios, detalhada e justificada no Capítulo 5.

3.4 Estimativa das consequências dos acidentes – análise de vulnerabilidade

De acordo com CETESB (2003, p.40), análise de vulnerabilidade significa:

Estudo realizado por intermédio de modelos matemáticos para a previsão dos impactos danosos às pessoas, [...] para os efeitos de sobrepressão decorrentes de explosões, radiações térmicas decorrentes de incêndios e efeitos tóxicos de emissões agudas de substâncias químicas na atmosfera.

A estimativa das consequências dos acidentes envolvendo substâncias inflamáveis deve ser precedida pela elaboração de uma Árvore de Eventos, a fim de estimar a probabilidade de falha/sucesso dos diferentes tipos de fenômenos que cada cenário acidental pode gerar, como explicado sub-seção 3.4.1.

A estimativa das consequências é realizada através da modelagem do vazamento do GNL e do GN. Os modelos matemáticos de descarga, formação e evaporação da poça e dispersão da nuvem formada podem ser vistos em Yellow Book CPR14E (2005). Woodward e Pitblado (2010) apresenta os modelos especificamente para o vazamento de GNL.

Essa modelagem pode ser feita através de softwares específicos, tais como EFFECTS, da TNO, e PHAST, da DNV. Este último já foi validado para diversos cenários envolvendo liberação de GNL, como pode ser visto em Baik, Raghunathan e Witlox (2005).

A sub-seção 3.4.2 mostra a metodologia para cálculo de vulnerabilidade.

3.4.1 Árvore de Eventos

A Análise de Árvore de Eventos permite sequenciar os fatos que podem se desenvolver a partir do cenário de estudo e suas respectivas probabilidades. No caso de liberação de substâncias inflamáveis, as consequências dos acidentes são dependentes de uma fonte de ignição imediata ou tardia.

As probabilidades de ignição imediata e tardia para diversos tipos de instalações podem ser encontradas em manuais de referência de análise de risco.

No caso de liberação de Gás Natural Liquefeito e Gás Natural, como já dito na sub-seção 2.2, as possíveis consequências são, no caso de ignição imediata, incêndio em poça andiantado e jato de fogo, respectivamente, e no caso de ignição tardia, incêndio em nuvem. No caso de liberação de GNL, pode ainda haver incêndio em poça retardado. As condições para existência do incêndio em poça retardado são que a poça ainda esteja presente no momento do incêndio em nuvem, ou seja, não tenha evaporado totalmente; e que a nuvem não tenha se afastado muito da fonte até o momento de sua ignição, de forma que ainda esteja sobre a poça e o fogo possa voltar a ela. As Árvores de Evento para a liberação de GNL e de GN no terminal offshore estão ilustradas nas Figuras 3.2 e 3.3, respectivamente:

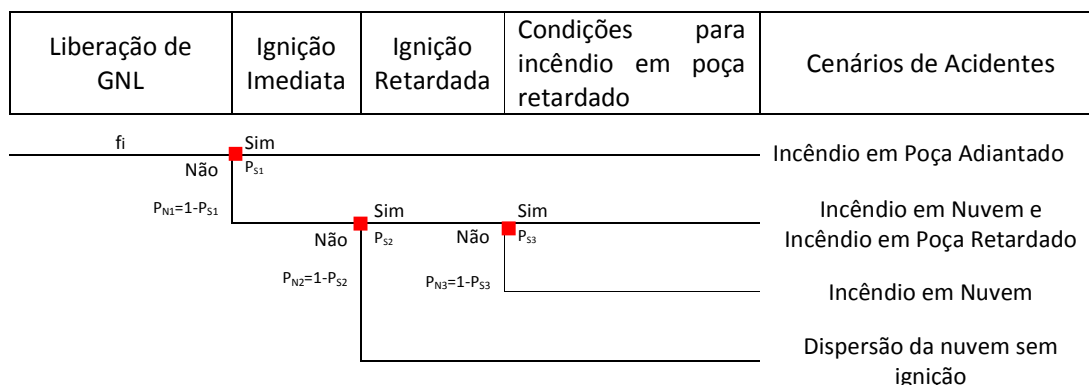


Figura 3.2: Árvore de Eventos para a liberação de Gás Natural Liquefeito

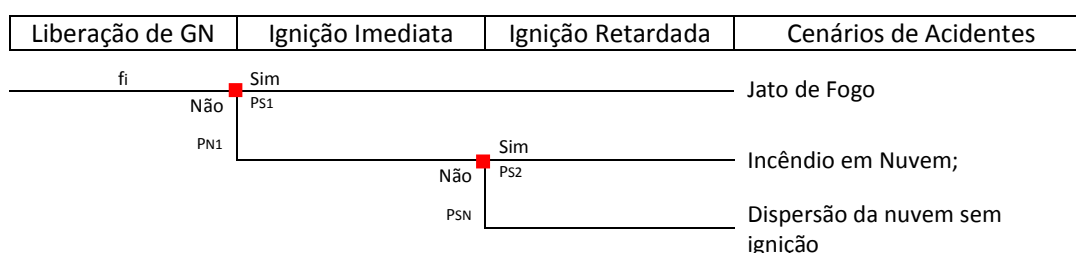


Figura 3.3: Árvore de Eventos para liberação de Gás Natural

A frequência final de cada efeito físico pode ser calculada multiplicando-se a frequência do Evento Iniciador f_i pelos valores de probabilidade do caminho até ele. Assim, no caso de vazamento de GNL, por exemplo, a frequência do incêndio em poça adiantado será $f_i \times P_{S1}$, enquanto do incêndio em nuvem com incêndio em poça retardado será $f_i \times P_{N1} \times P_{S2} \times P_{S3}$.

Considerando o terminal uma instalação estacionária, a probabilidade de ignição imediata é dada pela Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Probabilidades de ignição imediata para instalações estacionárias

Tipo de vazamento		Substância		
Contínuo	Instantâneo	Líquido	Gás, reatividade baixa	Gás, reatividade média/alta
< 10kg/s	< 1000kg	0,065	0,02	0,2
10-100 kg/s	1000-10000kg	0,065	0,04	0,5
>100 kg/s	>10000kg	0,065	0,09	0,7

Fonte: Purple Book CPR18E

As probabilidades de ignição retardada, por sua vez, são estimadas levando em consideração todas as fontes de ignição que se encontram dentro da nuvem de vapor, delimitada pelo Limite Inferior de Inflamabilidade (LII), conforme Tabela 3.5

Tabela 3.5: Probabilidade de Ignição Retardada

Fontes de Ignição	Probabilidade de Ignição Retardada
Nenhuma	0,1
Muito Poucas	0,2
Poucas	0,5
Muitas	0,9

Fonte: Cox, Lees e Ang, 1990

3.4.2 Cálculo da Vulnerabilidade⁷

A determinação das probabilidades de morte (vulnerabilidade) é feita através de equações Probit. A relação entre a probabilidade de um efeito, P , e a sua função probit correspondente, Pr , é dada por:

$$P = 0,5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Pr - 5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Sendo:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

Para uso prático, a probabilidade de um efeito, P , e a sua probit correspondente, Pr , já foi relacionada, de acordo com a Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Relação entre o Probit e a Probabilidade

P	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
0.1	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
0.2	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
0.3	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
0.4	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
0.5	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
0.6	5.25	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
0.7	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
0.8	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
0.9	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33

Fonte: Purple Book CPR18E(2005)

⁷ Baseado em Purple Book CPR18e

No caso de exposição a jato de fogo ou incêndio de poça, a probabilidade de morte é considerada igual a 1 para pessoas que estiverem dentro do envelope da chama. Para além do envelope da chama, a função Probit é função da radiação térmica e do tempo de exposição à radiação, de acordo com a Equação 3.2. Depois de calculado o Probit a probabilidade de morte correspondente pode ser vista da Tabela 3.6 ou calculada pela Equação 3.1.

$$Pr = -36,38 + 2,56 \times \ln (Q^{4/3} \times t) \quad (\text{Eq. 3.2})$$

sendo:

Pr = probit correspondente a probabilidade de morte;

Q = radiação térmica (W/m^2) e

t = tempo de exposição (s)

No caso de incêndio em nuvem, a probabilidade de morte é igual a 1 para quem estiver sob o envelope da nuvem (limitada pelo Limite Inferior de Inflamabilidade – LII) e zero para aqueles que estiverem além dela.

3.5 Estimativa e avaliação dos riscos

De acordo com CETESB (2003, p.29), “nos estudos de análise de riscos cujos cenários acidentais extrapolem os limites do empreendimento e possam afetar pessoas, os riscos deverão ser estimados e apresentados nas formas de Risco Social e Risco Individual.”

3.5.1 Cálculo do Risco Individual

De acordo com a CETESB (2003, p.27), “o risco individual pode ser definido como o risco para uma pessoa presente na vizinhança de um perigo, considerando a natureza do dano que pode ocorrer e o período de tempo em que o mesmo pode acontecer”.

Por ser difícil avaliar certos danos mais subjetivos e para os quais não existem dados estatísticos, os danos individuais são estimados em termos de danos irreversíveis ou

fatalidades. Eles podem ser estimados para um indivíduo que esteja mais exposto a um perigo, para um grupo de pessoas ou para a média de pessoas presentes na zona de efeito. (CETESB, 2003)

O risco individual total num determinado ponto pode ser calculado pela somatória de todos os riscos individuais nesse ponto, conforme apresentado a seguir:

$$RI_{x,y} = \sum_{i=1}^n RI_{x,y,i} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Sendo:

$RI_{x,y}$ = risco individual total de fatalidade no ponto x,y (chance de fatalidade por ano (ano^{-1}));

$RI_{x,y,i}$ = risco de fatalidade no ponto x,y devido ao evento i (chance de fatalidade por ano (ano^{-1}));

n = número total de eventos considerados na análise.

O risco de fatalidade em determinado ponto devido ao evento i é calculado pelo seguinte equação:

$$RI_{x,y,i} = f_i \cdot p_{fi} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Sendo:

f_i = frequência de ocorrência do evento i;

p_{fi} = probabilidade que o evento i resulte em fatalidade no ponto x,y, de acordo com os efeitos resultantes das consequências esperadas (CETESB, 2003, p.27).

A apresentação dos resultados é feita através de curvas de iso-riscos. O contorno de determinado nível de risco individual representa a frequência esperada de um evento capaz de causar dano em local específico.

A Figura 3.4 ilustra as curvas de iso-risco para uma planta fictícia.

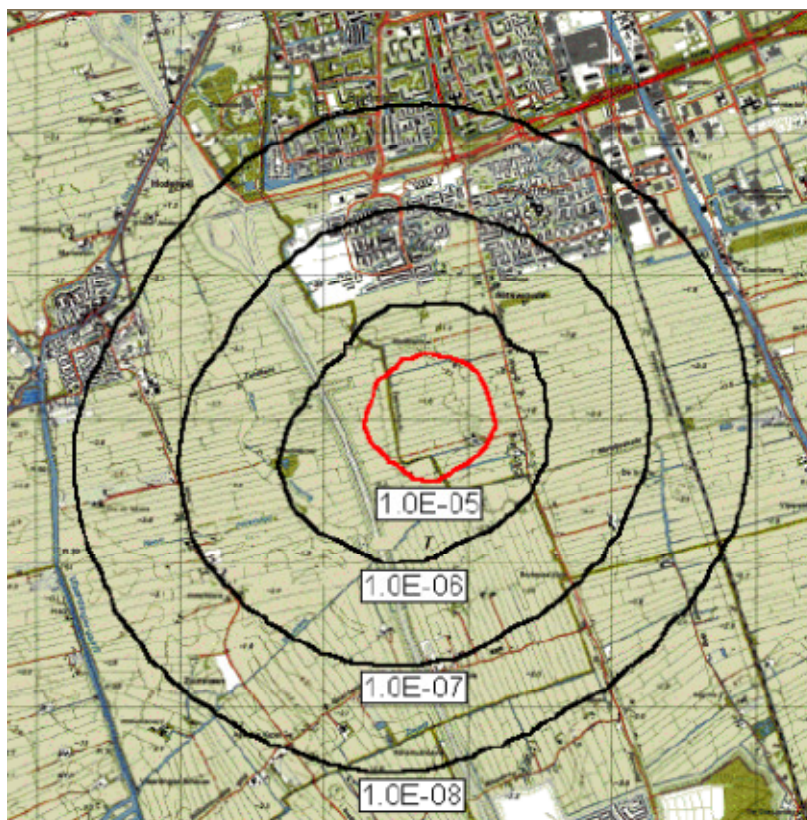


Figura 3.4: Apresentação das curvas de iso-risco. Estão representado os contornos de risco individual correspondentes a 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} e 10^{-8} ano⁻¹.

Os limites de aceitação dos riscos individuais estabelecidos pela CETESB (2003) são:

- Risco máximo tolerável: 1×10^{-5} ano⁻¹;
- Risco negligenciável: $< 1 \times 10^{-6}$ ano⁻¹.

Os riscos situados na região entre as curvas limites dos riscos intoleráveis e negligenciáveis, denominada *ALARP (As Low As Reasonably Practicable)*, embora situados abaixo da região de intolerabilidade, devem ser reduzidos tanto quanto praticável.

3.5.2 Cálculo do risco social

De acordo com CETESB (2003, p.24):

O *risco social* refere-se ao risco para um determinado número ou agrupamento de pessoas expostas aos danos decorrentes de um ou mais cenários acidentais. [...] A forma de apresentação do *risco social* deverá ser feita através da curva F-N, obtida por meio da plotagem dos dados de

frequência acumulada do evento final e seus respectivos efeitos representados em termos de número de vítimas fatais.

Neste sentido, o cálculo do risco social envolve a combinação do evento inicial, da direção do vento e do evento de ignição (para substâncias inflamáveis). Para cada combinação calcula-se o número esperado de mortes na área de uma célula definida. O número esperado de mortes em todas as células, N , é então calculado para cada combinação separadamente. Finalmente, a frequência acumulada de se ter mais de N mortes é determinada, podendo-se plotar mais um ponto na curva F-N. Dessa forma, para vários valores de N , pode-se construir a curva.

Os passos seguintes, adaptados a partir de TNO *Purple Book* (2005), descrevem o método para o cálculo do Risco Social:

1. Selecionar:
 - um evento inicial, S , com frequência f_S
 - uma direção do vento, k , com frequência f_k
 - um evento de ignição, i , com probabilidade p_i de ocorrência (apenas para substâncias inflamáveis)
2. Selecionar uma célula e definir o número populacional na célula, N_{cel} .
3. Calcular a fração de mortes, F_d , na célula, dado o evento inicial, a direção do vento e o evento de ignição. A altura de referência para o cálculo dos efeitos é igual a 1 metro.
4. Calcular o número esperado de mortes na célula, $N_{cel,S,k,i}$, dado o evento inicial, a direção do vento e o evento de ignição.

$$N_{cel,S,k,i} = F_d \times N_{cel} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

O número esperado de mortes na célula não é necessariamente um número inteiro.

5. Repetir passos 2 a 4 para todas as células (grade inteira). Calcular a contribuição de todas as células para o total de número de mortes, $N_{S,k,i}$, para o evento inicial S , a direção do vento k e o evento de ignição i .

$$N_{S,k,i} = \sum_{\text{toda grade}} N_{cel,S,k,i} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

6. Calcular a frequência, $f_{S,k,i}$, da combinação do evento inicial S , a direção do vento k e o evento de ignição i .

$$f_{S,k,i} = f_S \times P_k \times P_i \quad (\text{Eq. 3.7})$$

7. Repetir o cálculo dos passos 1 a 6 para todos os eventos iniciais, direções do vento e eventos de ignição. A curva F-N é agora construída pela frequência acumulada de todas as frequências $f_{S,k,i}$ para as quais $N_{S,k,i}$ é maior do que N :

$$FN = \sum_{S,k,i} f_{S,k,i} \quad \forall N_{S,k,i} \geq N \quad (\text{Eq. 3.8})$$

No caso do risco social, os limites estabelecidos pela CETESB (2003) estão ilustrados na Figura 3.5, sobre o gráfico F-N.

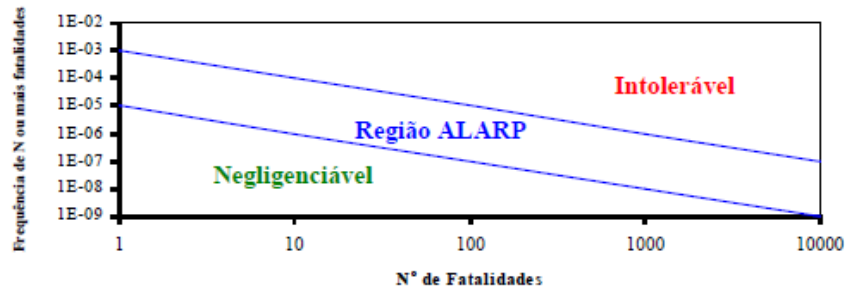


Figura 3.5: Limites de risco social estabelecidos pela CETESB (2003) em curva F-N

Capítulo 4: Conceitos da Análise Bayesiana

Conforme dito no Capítulo 3, o risco pode ser definido como um resultado da combinação entre a consequência de um evento com sua frequência. Por exemplo, determinados eventos podem ter consequências extremas, como a ruptura de um tanque ou reator, e apresentarem frequências de ocorrência muito baixas, gerando um risco que pode estar na zona tolerável. A fissura de uma linha, por outro lado, apesar de exibir consequências mais moderadas, por apresentar altas frequências ou probabilidades de ocorrência, pode gerar maior risco.

Em uma Análise Quantitativa de Risco, essas frequências ou probabilidades de ocorrência precisam ser estimadas para poder, então, viabilizar a quantificação de métricas de risco. A estimação das frequências e probabilidades de ocorrência de eventos é realizada a partir de dados de falha de equipamentos da unidade sendo analisada ou, na ausência destes, a partir de dados parcialmente relevantes como dados de falhas de equipamentos semelhantes em unidades diferentes à em análise, a partir de dados de falha em banco de dados de confiabilidade, e a partir de opiniões de especialistas. Veja o Capítulo 5 para maiores detalhes.

Este capítulo tem como objetivo introduzir conceitos de probabilidade e estatística e da abordagem Bayesiana, explicada com detalhes para cálculo das frequências no Capítulo 5.

Existem duas abordagens principais a serem utilizadas em uma análise estatística, cada uma baseada em uma diferente definição de probabilidade. A primeira abordagem é a frequentista, também chamada de clássica. Nesta, a probabilidade de ocorrência de um evento é calculada como a fração das vezes em que o evento ocorreu, dada repetição do experimento por uma grande quantidade de vezes (VOSE,2008).

A segunda abordagem é a Bayesiana, cujo nome deve-se ao matemático inglês Thomas Bayes. Neste contexto o conceito de probabilidade é subjetivo, sendo definido como uma medida do grau de confiança em um evento, dada a informação disponível. Assim, a probabilidade refere-se ao estado de conhecimento de um indivíduo, e não às propriedades de uma sequência de eventos observados (GREGORY, 2005; VALLVERDÚ, 2008).

4.1 A Abordagem Bayesiana

O método Bayesiano existe desde o final do século 17, mas foi em 1812 que, pela primeira vez, foi aplicado com sucesso de forma quantitativa - a partir do teorema de Bayes, Laplace foi capaz de calcular uma distribuição de probabilidade para a massa de Saturno (KELLY; SMITH, 2011).

O teorema de Bayes provê um método matemático para atualização de um conhecimento sobre determinado evento a partir da introdução de evidências sobre o mesmo, de acordo com o teorema de Bayes:

$$p(\theta|y) = \frac{p(\theta) \times p(y|\theta)}{p(y)} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Em que:

$p(\theta|y)$ é a a distribuição a posteriori, que expressa o conhecimento sobre o parâmetro θ após a obtenção das evidências y ;

$p(\theta)$ é a distribuição a priori do parâmetro θ , que expressa o conhecimento sobre θ antes da obtenção das evidências;

$p(y|\theta)$ é a função de verossimilhança ou distribuição de probabilidade dos dados y condicionais nos parâmetros θ , que fornece a plausibilidade de cada um dos possíveis valores do parâmetro θ ;

$p(y)$ é a distribuição marginal, e age como uma constante de normalização.

De uma forma geral, a relação fundamental do teorema de Bayes pode ser escrita como:

$$\text{distribuição a posteriori} = \frac{\text{distribuição a priori} \times \text{verossimilhança}}{\text{distribuição marginal}}$$

ou, sem a constante de normalização,

$$f(\theta|y) \propto \pi(\theta)f(y|\theta)$$

O Teorema de Bayes pode ser escrito para ambas variáveis discretas e contínuas, conforme Equações 4.2 e 4.3, respectivamente:

$$p(\theta|y) = \frac{p(\theta) \times p(y|\theta)}{\sum p(\theta) \times p(y|\theta)} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

$$\pi(\theta|y) = \frac{f(y|\theta) \times \pi_0(\theta)}{\int f(y|\theta) \times \pi_0(\theta) d\theta} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

A escolha da distribuição a priori é uma etapa subjetiva da análise. Ela pode ser informativa ou não informativa. As distribuições informativas contêm informações substanciais sobre os possíveis valores de θ enquanto as não informativas são utilizadas quando pretende-se deixar que as evidências dominem a distribuição a posteriori, ou seja, contêm pouca informação sobre o parâmetro de interesse (GREGORY,2005).

A Figura 4.1a ilustra um caso no qual faz-se uso de uma distribuição a priori não informativa: a distribuição a posteriori é dominada pela verossimilhança. Na Figura 4.1b observa-se o extremo oposto: os dados das evidências são bem menos seletivos que a distribuição a priori, que domina o resultado final.

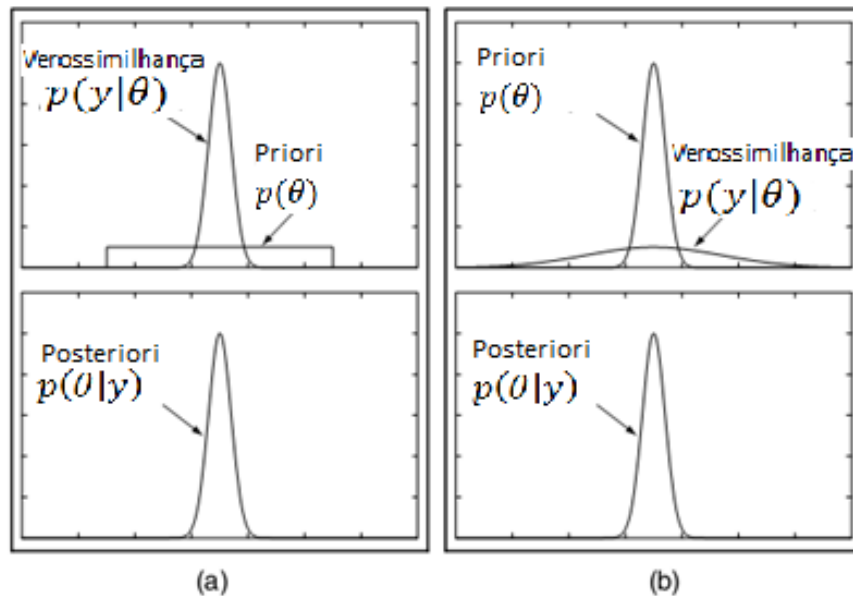


Figura 4.1: Influência da distribuição a priori e da verossimilhança na distribuição a posteriori pela teorema de Bayes, a partir de dois casos extremos: (a) distribuição a priori bem mais ampla que a verossimilhança; e (b): verossimilhança mais ampla que a priori

(Fonte: Gregory, 2005)

A abordagem Bayesiana apresenta diversas vantagens sobre a abordagem clássica, dentre as quais podem-se enumerar as seguintes:

1. Permite que se combinem dados a uma informação anterior a esses através de um modelo matemático. Quando novas informações tornam-se disponíveis, a distribuição a posteriori pode ser utilizada como a priori em uma nova análise;
2. Permite o uso de diversos tipos de dados como evidência;
3. Redução de Custos: estimativas e feedback baseados apenas em dados de teste são onerosos e podem trazer apenas benefícios marginais. Métodos Bayesianos usam a totalidade do conhecimento disponível e não apenas dados estatísticos. Acumular a mesma quantidade de informação através de testes é frequentemente inviável principalmente para produtos altamente confiáveis.

Dentre as desvantagens da análise Bayesiana podem ser citados o maior esforço para sua compreensão e aplicação, além do caráter subjetivo empregado na identificação e justificativa da distribuição a priori.

De acordo com os tipos de dados a serem tratados em uma análise Bayesiana, ela pode pertencer a duas classificações distintas: homogênea ou não homogênea. Estas classificações serão explicadas nas seções a seguir.

4.2 Análise Bayesiana Homogênea

O termo população homogênea indica que a população é idêntica em relação a algumas características de interesse. Se, por exemplo, todos os membros de uma população possuem a mesma taxa de falha, ela é dita homogênea em relação à taxa de falha.

No caso de uma análise Bayesiana homogênea, o uso dos chamados pares conjugados pode facilitar a seleção e identificação dos modelos probabilísticos da distribuição a priori, da verossimilhança e da distribuição a posteriori. As distribuições conjugadas mais utilizadas estão apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Distribuições conjugadas

Distribuição a Priori	Função de Verossimilhança	Distribuição a Posteriori
Beta	Binomial	Beta
Gamma	Poisson	Gamma
Normal	Normal	Normal
Lognormal	Lognormal	Lognormal

O uso das distribuições conjugadas pode facilitar a escolha da distribuição a priori e o cálculo da distribuição a posteriori.

Utilizando-se o par conjugado beta-binomial, por exemplo, a distribuição a priori tem a forma da equação 4.4, com os parâmetros “a” e “b” não negativos.

$$B(x|a, b) = \frac{\Gamma(a + b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} x^{a-1} (1 - x)^{b-1} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

A verossimilhança, por sua vez, será dada por:

$$P(k|N, x) = \binom{N}{k} x^k (1 - x)^{N-k} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

onde k é o número de vezes que os eventos de interesse ocorrem em N oportunidades.

A distribuição a posteriori, de acordo com a Equação 4.3, será determinada por

$$\text{Distribuição a Posteriori} = \frac{P(k|N, x) \times B(x|a, b)}{\int P(k|N, x) \times B(x|a, b) dx} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Assim,

$$\begin{aligned} \text{Distribuição a Posteriori} &= \frac{\binom{N}{k} \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} x^{a-1} x^k (1-x)^{N-k} (1-x)^{b-1}}{\int \binom{N}{k} \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} x^{a-1} x^k (1-x)^{N-k} (1-x)^{b-1} dx} \\ &= \\ &\frac{x^{a+k-1} (1-x)^{b+N-k-1}}{\int x^{a+k-1} (1-x)^{b+N-k-1} dx} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Definindo a' e b' tal que

$$a' = a + k$$

$$b' = b + N - k$$

tem-se que:

$$\text{Distribuição a Posteriori} = \frac{x^{a'-1} (1-x)^{b'-1}}{\int x^{a'-1} (1-x)^{b'-1} dx} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Como a distribuição Beta é uma função de densidade:

$$\int_0^1 \frac{\Gamma(a' + b')}{\Gamma(a')\Gamma(b')} x^{a'-1} (1-x)^{b'-1} dx = 1 \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Assim, a integral no denominador da Equação 4.8 reduz-se a:

$$\int_0^1 x^{a'-1} (1-x)^{b'-1} dx = \frac{\Gamma(a')\Gamma(b')}{\Gamma(a' + b')} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Finalmente, a distribuição a posteriori possui a seguinte forma:

$$B(x|a', b') = \frac{\Gamma(a' + b')}{\Gamma(a')\Gamma(b')} x^{a'-1} (1-x)^{b'-1} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

Portanto, utilizando-se o par conjugado beta-binomial, a distribuição a posteriori pode ser facilmente identificada como uma distribuição beta, com os parâmetros a' e b' , uma combinação dos parâmetros da distribuição a priori e da verossimilhança.

O mesmo raciocínio pode ser empregado para as demais distribuições conjugadas da Tabela 4.1.

A verossimilhança pode ser constituída a partir de várias evidências, provenientes de várias subpopulações. Se estas subpopulações são homogêneas entre si, os dados podem ser agrupados e utilizados em uma única aplicação do teorema de Bayes para se obter o conhecimento a posteriori representativo de toda a informação acumulada.

4.3 Análise Bayesiana Não-Homogênea

Devido a fatores como design, diferenças operacionais ou condições ambientais, os membros de uma subpopulação podem exibir características distintas das de uma outra subpopulação. Neste caso, não é realista assumir que todos os membros da população, composta das diferentes sub-populações, possuem os mesmo parâmetros de confiabilidade, como taxa de falha, por exemplo. A característica de interesse, no caso de uma população não-homogênea, é inerentemente diferente de uma subpopulação para outra. Isto é chamado variabilidade populacional da característica em questão. A variabilidade populacional faz parte de uma população não-homogênea, a não pode ser eliminada com maior quantidade de informações.

Para avaliar a distribuição a posteriori através do Modelo de Variabilidade Populacional é possível encontrar uma distribuição desta variabilidade para um certo parâmetro, digamos uma taxa de falha λ : $\phi(\lambda)$.

É possível assumir que a distribuição da variabilidade populacional $\phi(\lambda)$ é membro de família paramétrica, como beta, gama, lognormal. Sendo $\underline{\theta} = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m\}$ o conjunto dos parâmetros de $\phi(\lambda)$, ou seja, $\phi(\lambda) = \phi(\lambda|\underline{\theta})$, a distribuição da incerteza, ou estado de conhecimento, sobre $\phi(\lambda)$ é igual à sobre os valores de $\underline{\theta}$. Para cada valor de $\underline{\theta}$ existe um único $\phi(\lambda|\underline{\theta})$. Assim, estimando-se $\underline{\theta}$ estima-se também $\phi(\lambda)$.

Dada a evidência disponível, E , a uma distribuição a priori de $\underline{\theta}$, o Teorema de Bayes pode ser utilizado para encontrar a distribuição de probabilidade do estado de conhecimento de $\underline{\theta}$, de acordo com a Equação 4.12:

$$\pi(\underline{\theta}|E) = \frac{L(E|\underline{\theta})\pi_0(\underline{\theta})}{\int_{\theta_1} \int_{\theta_2} \dots \int_{\theta_m} L(E|\underline{\theta})\pi_0(\underline{\theta})d\underline{\theta}} \quad (\text{Eq. 12})$$

em que:

$\pi_0(\underline{\theta})$ é a distribuição a priori de $\underline{\theta}$;

$\pi(\underline{\theta}|E)$ é a distribuição a posteriori de $\underline{\theta}$ dada a evidência E (distribuição conjunta de probabilidade m-dimensional sobre os valores de $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$), exemplificada na Figura 4.2;

$L(E|\underline{\theta})$ é a verossimilhança de E dada $\underline{\theta}$.

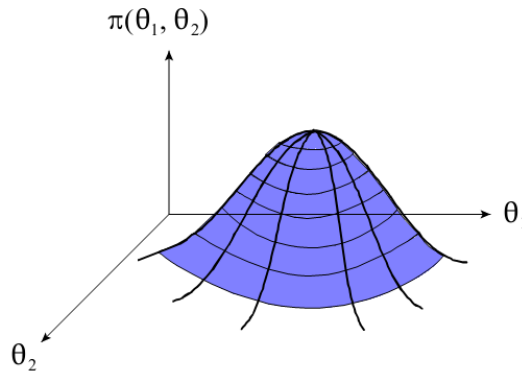


Figura 4.2: Exemplo de distribuição conjunta de probabilidade de $\underline{\theta} = \{\theta_1, \theta_2\}$

A distribuição esperada de probabilidade da variabilidade populacional é dada, finalmente, por:

$$\bar{\phi}(\lambda) = \int_{\theta_1} \dots \int_{\theta_m} \phi(\lambda|\theta_1 \dots \theta_m) \pi(\theta_1 \dots \theta_m|E) d\theta_1 \dots \theta_m \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Capítulo 5: Metodologia Bayesiana de Análise Quantitativa de Risco para Plantas de GNL

A etapa da análise de frequência de uma Análise Quantitativa de Riscos pode ser desenvolvida através de diferentes metodologias. No caso de um terminal de Gás Natural Liquefeito, devido à particularidade da indústria de GNL ser recente e a consequente escassez de dados de falha relevantes para a caracterização dos eventos iniciadores, a metodologia Bayesiana em Dois Estágios apresenta-se apropriada por permitir a utilização de dados empíricos assim como subjetivos (opiniões de especialistas, bancos de dados genéricos de confiabilidade) parcialmente relevantes ao problema em questão. Este capítulo apresenta a metodologia e os modelos envolvidos, completando assim a metodologia de AQR para terminais offshore de GNL explicada no Capítulo 3.

A estimativa da frequência de ocorrência de um evento acidental é uma informação primordial em uma Análise Quantitativa de Risco, e é obtida através de taxas de falhas e frequências de ocorrências de eventos envolvidos no cenário acidental como, por exemplo, vazamentos em válvulas e rupturas de tubulações.

Tais taxas e frequências são, em geral, estimadas a partir de dados empíricos como número de falhas de um equipamento e o tempo total de exposição, ou a partir de opiniões de especialistas ou estimativas disponíveis em bancos de dados genéricos de confiabilidade. Existem dois tipos de fontes destes dados de falha: dados coletados na própria planta que está sendo estudada, chamados de dados específicos, e dados reportados por indústrias em geral, chamados de dados genéricos. À primeira vista, parece mais correta a utilização dos dados específicos na Análise de Risco, entretanto, em diversas situações estes dados não são estatisticamente confiáveis ou simplesmente não existem. Pode se imaginar, por exemplo, uma planta que possui cinco vaporizadores, entre outros equipamentos, e está em funcionamento há 10 anos, nunca tendo apresentado falhas em qualquer um dos referidos vaporizadores.

Em outras palavras, a planta não possui nenhuma falha em 50 vaporizadores-ano. O uso desta informação como única fonte de dados para o cálculo da frequência de ocorrência de falhas nos equipamentos levaria à conclusão de que, como a frequência anual de falha dos vaporizadores é zero, eles nunca falharão, uma informação incorreta. O uso dos dados genéricos, por outro lado, podem não caracterizar muito bem o equipamento em questão, visto que a falha de um equipamento é bastante dependente de suas condições de operação, manutenção, fornecedores, etc.

Assim, os dois tipos de fontes de dados possuem limitações em seu uso, especialmente no caso de indústrias com pouco tempo de funcionamento ou no estudo de eventos muito raros, que podem, até mesmo, ser ainda hipotéticos no momento da realização do estudo.

Através do uso da análise Bayesiana é possível utilizar os dois tipos de dados no cálculo das frequências, considerando assim a experiência histórica de outras indústrias porém (parcialmente) relevantes à planta em análise, e experiências específicas da planta em questão. Além da possibilidade de utilizar dados genéricos e específicos, podem ser utilizadas também diversas fontes de dados, como opiniões de especialistas e dados de falha no tempo (empíricos) (SIU;KELLY,1998; SHAFAGHI,2006;FERSON,2005).

O uso da análise Bayesiana implica no uso do conceito de probabilidade subjetiva. Ou seja, a probabilidade é a representação da incerteza de um analista, por exemplo, sobre os parâmetros de um modelo de probabilidade ou sobre a opinião de um especialista (SIU;KELLY,1998). A abordagem Bayesiana, dessa forma, formaliza o uso explícito de informação subjetiva, tais como julgamentos pessoais feitos pelo analista ou por especialistas, e permite que julgamentos subjetivos sejam utilizados em problemas objetivos. Isto é uma grande vantagem no contexto da Análise de Risco porque, em muitos estudos, a maioria das informações disponíveis (ou todas) é subjetiva (FERSON, 2005).

Por estas razões a análise Bayesiana é bastante aplicável em indústrias de Gás Natural Liquefeito. O tempo de operação das indústrias de GNL não é suficiente para garantir relevância estatística aos dados de falha, ao contrário de indústrias como refinarias e outras petroquímicas. Assim sendo, o cálculo de frequências dos acidentes em um terminal de GNL pode ser feito com uso da análise Bayesiana, de forma a

acrescentar à base de dados de falhas de equipamentos da indústria de GNL, os dados genéricos de outras indústrias, em funcionamento há mais tempo, assim como opiniões de especialistas e estimativas de bancos de dados de confiabilidade.

A inferência Bayesiana, conforme dito no Capítulo 3, consiste em atualizar uma distribuição a priori, que corresponde à estimativa da taxa de falhas que o analista tem antes de obter qualquer outra informação adicional, através do uso de evidências em uma função de verossimilhança, obtendo assim uma distribuição a posteriori.

Nos métodos Bayesianos, os dados genéricos são geralmente modelados como a distribuição a priori e os dados específicos como as funções de verossimilhança (YAN;HAIMES,2010).

Esta aplicação convencional do teorema de Bayes foi utilizada por Yun (2007) para determinação das frequências de acidentes em um terminal de GNL, utilizando dados genéricos de bancos de dados como OREDA⁸ e EIREDA⁹ como distribuição a priori e atualizando-os com dados de plantas de GNL.

Entretanto, esta metodologia tem um problema: apesar de os dados serem coletados a partir de uma variedade de fontes, como diferentes plantas com diferentes condições de operação, eles são tratadas como provenientes de uma mesma fonte, ou seja, supõe-se que sejam constituintes de uma população homogênea. As incertezas provenientes da variabilidade de fonte para fonte são ignoradas (como as diferenças entre as condições operacionais, políticas de manutenção, diferenças de fabricantes, etc), o que faz com que a distribuição a posteriori resultante tenda a ser muito estreita, ou seja, ocorre uma subestimação do nível de incerteza (SIU,KELLY,1998). Por essas razões, a metodologia aplicada por Yun (2007,2008) para a determinação de frequências dos acidentes em um terminal de GNL é inapropriada quando aplicada para contextos com escassez de dados e o uso de fontes alternativas de informação.

A Análise Bayesiana em Dois Estágios, primeiramente introduzida no contexto de análise de risco por Kaplan (1983), considera esta não-homogeneidade dos dados de falha na estimativa dos parâmetros dos modelos probabilísticos de uma determinada grandeza de interesse (como a frequência de ocorrência de um evento acidental), cuja

⁸*Offshore Reliability Data*, banco de dados baseado em instalações *off-shore*.

⁹*European Industry Reliability Data Bank*, banco de dados baseado em usinas de energia nuclear operadas por *Electricite de France*.

distribuição a posteriori resultante é então utilizada como a distribuição a priori no segundo estágio da análise, conforme Figura 5.1.

Assim, devido ao curto tempo de existência dos terminais de GNL, à consequente falta de dados estatisticamente relevantes sobre estes terminais e à não-homogeneidade inerente aos dados disponíveis, a Análise Bayesiana em Dois Estágios é a forma apropriada para calcular a frequência de ocorrência de um evento em um terminal de GNL, e deve ser incluída na metodologia de AQR para plantas de GNL.

A metodologia proposta, portanto, segue o mesmo esquema de uma AQR em geral, como mostrado na Figura 3.1, explicitando-se, entretanto, o uso Análise Bayesiana em Dois Estágios para o cálculo de frequências dos eventos, conforme ilustrado na Figura 5.2.

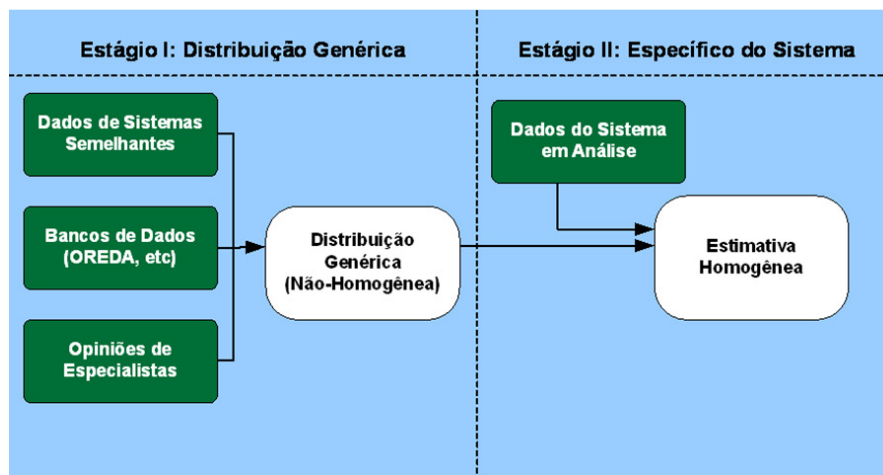


Figura 5.1: Análise Bayesiana em Dois Estágios

As etapas referentes à análise de consequências e cálculo dos riscos segue a metodologia convencional de uma AQR, como explicado no Capítulo 3. A metodologia do primeiro e do segundo estágio da Análise Bayesiana em Dois Estágios está descrita nas sub-seções a seguir.

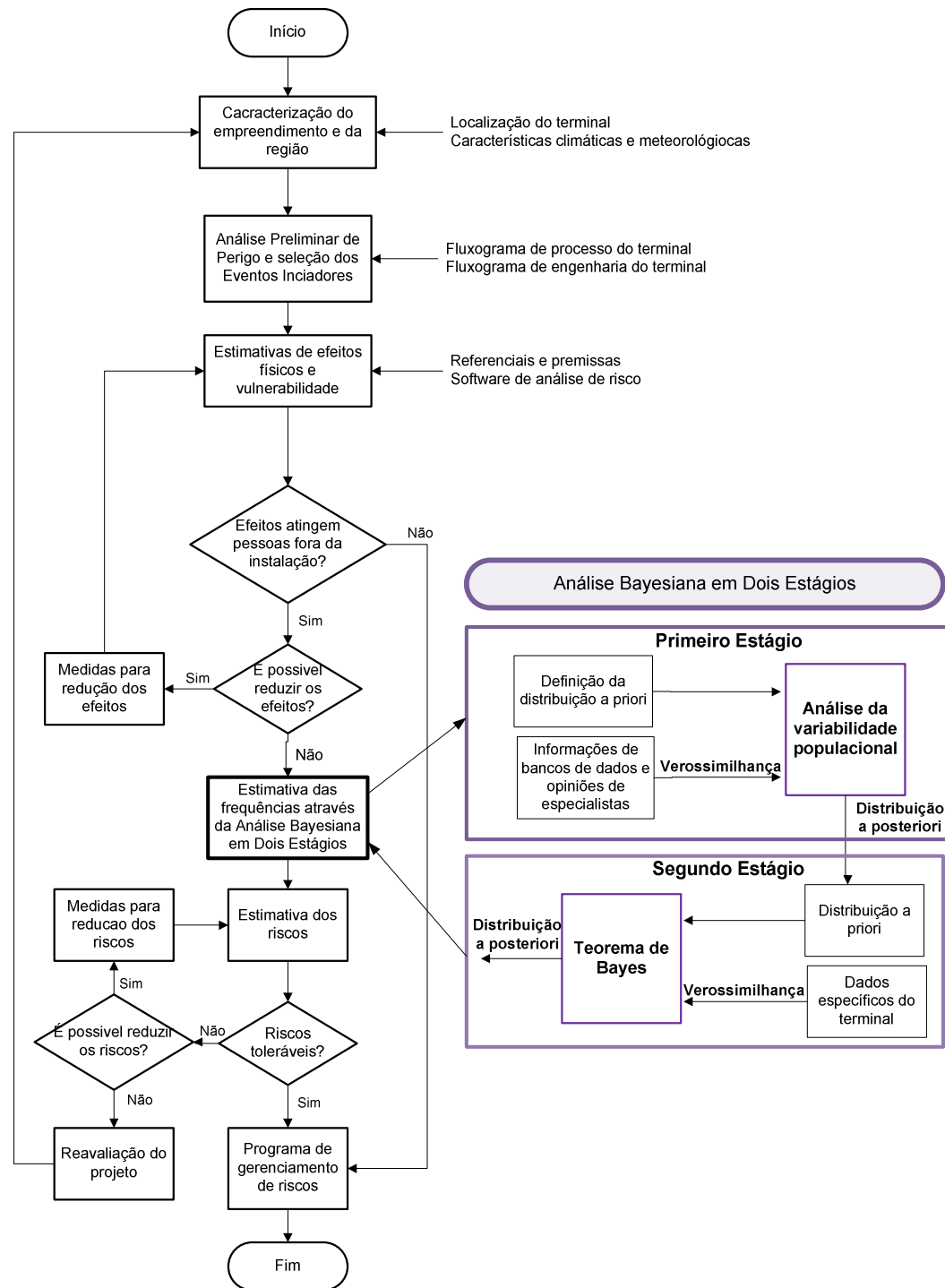


Figura 5.2: Metodologia de AQR para um terminal de GNL com uso da Análise Bayesiana em Dois Estágios

5.1 Primeiro Estágio

O primeiro estágio da Análise Bayesiana em Dois Estágios considera a não-homogeneidade das amostras (sub-populações) em relação ao parâmetro de interesse – frequência do evento, por exemplo. Os conceitos e o funcionamento básico da análise Bayesiana não-homogênea foram apresentados no Capítulo 4, e serão retomados aqui explicitando a aplicação no cálculo de frequência de acidentes.

Pode-se considerar um exemplo em que se conhecem os valores das taxas de falhas λ de determinado evento (ruptura do braço de descarregamento de GNL, por exemplo) para diversas plantas de GNL, exceto para a que está sendo estudada (planta k), e elas se comportam como na Figura 5.3.

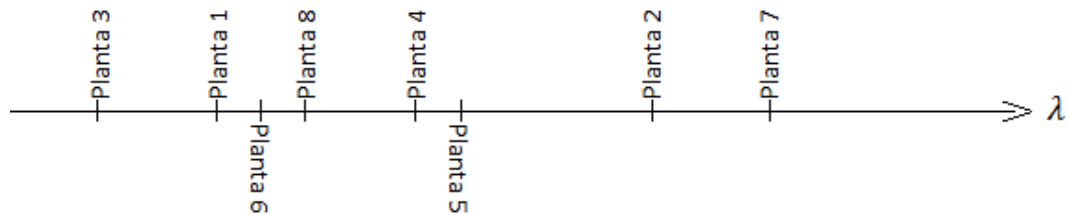


Figura 5.3: Ilustração de frequências de um determinado evento em plantas de GNL

A Figura 5.3 poderia ser utilizada para gerar um histograma da frequência do evento e, no caso de haver uma grande quantidade de plantas, o histograma poderia ser aproximado para uma função de densidade de probabilidade, como a mostrada na Figura 5.4, em que se considerou que esta função tem os parâmetros $\underline{\theta}$. Esta função de probabilidade é chamada curva de variabilidade populacional, $\phi(\lambda|\underline{\theta})$ (SIU;KELLY,1998).

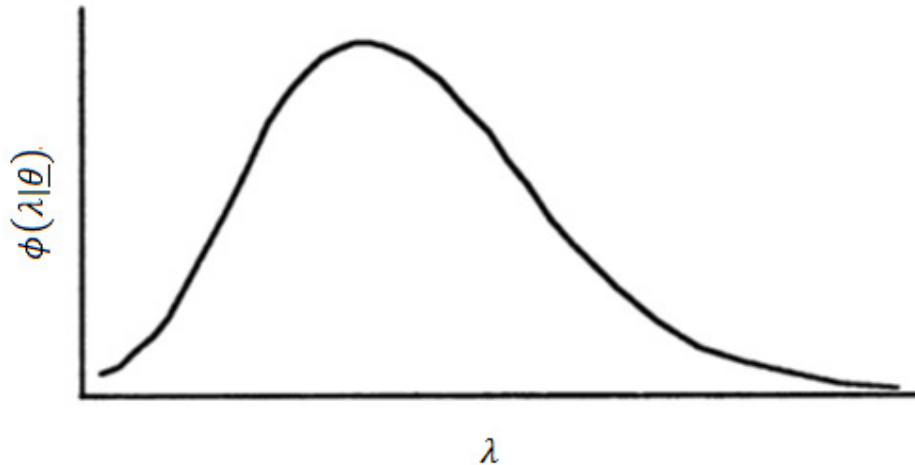


Figura 5.4: Curva de variabilidade populacional hipotética

A curva de variabilidade populacional é utilizada porque a única informação que se tem sobre a planta k é que ela pertence à população representada na Figura 5.3, isto é, não se tem motivos para acreditar que a planta em questão é muito diferente do restante das plantas. Assim, a curva de variabilidade populacional fornece uma distribuição a priori razoável para a frequência do acidente na planta k (SIU;KELLY,1998).

Entretanto, a exata forma da curva é desconhecida, pois o vetor dos parâmetros $\underline{\theta}$ é desconhecido.

Durante o primeiro estágio da análise o objetivo é, portanto, desenvolver a distribuição de probabilidade caracterizando a incerteza sobre os parâmetros da variabilidade populacional $\pi(\underline{\theta}|E)$ (seguindo a premissa de que ela faz parte de uma família paramétrica de distribuições), a partir da qual poderá ser gerada uma distribuição média (esperada) da variabilidade populacional que poderá então ser utilizada como a distribuição a priori no segundo estágio da análise, conforme Figura 5.1.

Considerando que o conhecimento inicial sobre os parâmetros $\underline{\theta}$ é representado pela distribuição de probabilidade $\pi_0(\underline{\theta})$, e dada a evidência disponível E , a distribuição de probabilidade a posteriori de $\underline{\theta}$ é dada pelo teorema de Bayes conforme mostrado na Equação 3.12.

$$\pi(\underline{\theta}|E) = \frac{L(E|\underline{\theta})\pi_0(\underline{\theta})}{\int_{\theta_1} \int_{\theta_2} \dots \int_{\theta_m} L(E|\underline{\theta})\pi_0(\underline{\theta})d\underline{\theta}} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

O conjunto de evidências E do parâmetro de interesse X pode ser composto por quatro tipos de evidências:

E₀: Estado de conhecimento inicial do analista (esta evidência é utilizada na construção da distribuição a priori, e pode indicar mesmo que o conhecimento inicial do analista é muito pouco ou nenhum, gerando a priori não-informativa);

E₁: Dados empíricos (quantidade de falhas por tempo ou por demanda) de sistemas similares operando em condições similares;

E₂: Estimativas ou distribuições sobre X a partir de bancos de dados de confiabilidade ou opiniões de especialistas;

E₃: Dados empíricos específicos do sistema analisado.

A distribuição do parâmetro de interesse, depois de obtidas as evidências E₀, E₁, E₂ e E₃, pode ser escrita então como:

$$\pi(x|E_0, E_1, E_2, E_3) = \frac{P(E_3|x, E_0, E_1, E_2) \int_{\underline{\theta}} \varphi(x|\underline{\theta})\pi(\underline{\theta}|E_0, E_1, E_2)d\underline{\theta}}{\int_x P(E_3|x, E_0, E_1, E_2) \int_{\underline{\theta}} \varphi(x|\underline{\theta})\pi(\underline{\theta}|E_0, E_1, E_2)d\underline{\theta} dx} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

em que a distribuição a priori, $\int_{\underline{\theta}} \varphi(x|\underline{\theta})\pi(\underline{\theta}|E_0, E_1, E_2)d\underline{\theta}$, é a densidade da variabilidade populacional esperada.

Explicitando as evidências consideradas, a distribuição dos parâmetros $\pi(\underline{\theta}|E)$ mostrada na Equação 3.12 pode ser escrita como:

$$\pi(\underline{\theta}|E_0, E_1, E_2) = \frac{P(E_1, E_2|\underline{\theta}, E_0)\pi_0(\underline{\theta}|E_0)}{\int_{\underline{\theta}} P(E_1, E_2|\underline{\theta}, E_0)\pi_0(\underline{\theta}|E_0)d\underline{\theta}} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Assumindo que as evidências E₁ e E₂ são independentes entre si, e considerando que normalmente existe mais de uma fonte para cada tipo de evidência, a verossimilhança da Equação 5.2 pode ser escrita como

$$P(E_1, E_2|\underline{\theta}, E_0) = \prod_{i=1}^n P(E_{1i}|\underline{\theta}, E_0)P(E_{2i}|\underline{\theta}, E_0) \quad (\text{Eq. 5.3})$$

onde $P(E_{1i}|\underline{\theta}, E_0)$ e $P(E_{2i}|\underline{\theta}, E_0)$ são as probabilidades de observar as evidências E_{1i} e E_{2i} , respectivamente, para i -ésimo de n sistemas, assumindo que o parâmetro da curva de variabilidade populacional é $\underline{\theta}$.

A medida exata de parâmetro de interesse em cada sistema, x_i , é desconhecida, sabendo-se apenas que ele é um dos possíveis valores de X . Além disso, X é distribuído de acordo com $\varphi(x|\underline{\theta})$, com $\underline{\theta}$ também desconhecido. Assim, calcula-se a probabilidade de observar as informações E_1 e E_2 considerando que o parâmetro de interesse pode assumir todos os valores possíveis, ou seja, integrando $P(E_1, E_2|\underline{\theta}, E_0)$ sobre toda a distribuição de X :

$$P(E_{1i}, E_{2i}|\underline{\theta}, E_0) = \int_x P(E_{1i}|\underline{\theta}, E_0)P(E_{2i}|\underline{\theta}, E_0)\varphi(x|\underline{\theta})dx \quad (\text{Eq. 5.4})$$

A Equação 5.4 pode, então, ser substituída na Equação 5.3 para obter a função de verossimilhança a partir de todas as evidências.

No caso de a evidência disponível ser apenas do tipo E_1 , a verossimilhança será $\int_x P(E_{1i}|\underline{\theta}, E_0)\varphi(x|\underline{\theta})dx$, e, de forma similar, possuindo apenas evidência do tipo E_2 a verossimilhança será $\int_x P(E_{2i}|\underline{\theta}, E_0)\varphi(x|\underline{\theta})dx$.

Os modelos de probabilidade aplicados à distribuição a priori $\pi_0(\underline{\theta}|E_0)$ ¹⁰ e à verossimilhança $L(E|\underline{\theta})$ estão descritos nas sub-seções a seguir.

5.1.1 Distribuição a priori

A distribuição a priori no primeiro estágio da Análise Bayesiana em Dois Estágios reflete o conhecimento inicial sobre a variabilidade populacional, e não sobre a frequência de evento do sistema de interesse, como na aplicação convencional do teorema de Bayes (DROGUETT; GROEN; MOSLEH, 2003).

Como adiantado no Capítulo 3, a priori pode ser informativa ou não informativa. Uma priori informativa reflete o conhecimento do analista em relação ao parâmetro de interesse. O desenvolvimento de uma distribuição a priori informativa pode ser

¹⁰ $\pi_0(\underline{\theta}|E_0)$ será escrito apenas como $\pi_0(\underline{\theta})$ no restante da dissertação.

complicado, pois exige que o analista converta o conhecimento que ele tem antes de obter as evidências, que é qualitativo, em medidas quantitativas (SIU;KELLY,1998).

Entretanto, conforme aumenta a quantidade de evidências utilizadas na verossimilhança, menor é a influência da distribuição a priori na posteriori. Como a posteriori gerada neste primeiro estágio ainda será utilizada como priori no segundo, a distribuição a priori deste estágio terá ainda menor influência na distribuição final.

Assim, na maioria dos casos uma distribuição a priori não informativa pode ser utilizada. O uso desta distribuição indica que o analista não tem muito conhecimento sobre o parâmetro de interesse, e deseja que a distribuição a posteriori seja definida principalmente pelas evidências.

Um exemplo de distribuição para este tipo de contexto é uma distribuição Lognormal com mediana igual à média dos valores dos dados utilizados como evidências. Neste caso, a falta de confiança nesta distribuição pode ser introduzida a partir de um alto valor do fator de erro α , definido para uma distribuição Lognormal pela Equação 5.5:

$$\alpha = \frac{\mu}{P_{5\%}} = \frac{P_{95\%}}{\mu} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

em que μ é a mediana, definida para uma distribuição Lognormal com média ν como $\mu = e^\nu$, e $P_{5\%}$ e $P_{95\%}$ referem-se aos percentis de 5 e 95% da distribuição, respectivamente.

Maiores informações sobre distribuições a priori informativas e não-informativas podem ser encontradas Kaplan (1983), Porn (1996) Meyer e Hennings (1999), entre outros.

5.1.2 Verossimilhança

Como dito anteriormente, a verossimilhança $L(E|\theta)$ pode fazer parte de três categorias distintas, a depender do tipo de evidência disponível: i) verossimilhança baseada em dados empíricos, correspondentes a informações constituídas por número de falhas em determinado tempo; ii) verossimilhança baseada em opiniões de especialistas (ou estimativas do parâmetro obtidas a partir de bancos de dados de

confiabilidade), que corresponde a estimativas de possíveis valores da frequência do evento, e iii) verossimilhança mista, composta pelos dois tipos de dados acima. As verossimilhanças baseadas somente em dados empíricos ou em opiniões de especialistas podem ser consideradas particularidades da verossimilhança mista.

i) Verossimilhança baseada em dados empíricos¹¹

No caso de verossimilhanças baseadas em dados empíricos, as evidências são informações do tipo $\{(k_i, T_i), i=1...n\}$, onde k_i é o número de falhas observadas, em um tempo T_i , na amostra i , e n é a quantidade total de amostras. Sabendo a taxa de falha $\lambda_i = \lambda$ de cada amostra, a distribuição de Poisson pode ser utilizada para estimar a probabilidade de observar-se k_i falhas em um tempo T_i :

$$P(k_i, T_i | \lambda) = \frac{(\lambda T_i)^{k_i}}{k_i!} e^{-\lambda T_i} \quad (\text{Eq. 5.6})$$

Como a única informação que se sabe sobre λ é que ela é um dos possíveis valores da taxa de falha representada pela sua distribuição de variabilidade populacional $\phi(\lambda | \underline{\theta})$, integra-se a probabilidade sobre todos os valores de λ , de forma a tornar a probabilidade condicional em $\underline{\theta}$, e não mais em λ :

$$L(k_i, T_i | \underline{\theta}) = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda T_i)^{k_i}}{k_i!} e^{-\lambda T_i} \phi(\lambda | \underline{\theta}) d\lambda \quad (\text{Eq. 5.7})$$

Dependendo da família paramétrica escolhida para representar $\phi(\lambda | \underline{\theta})$, a integral pode ser calculada analiticamente ou numericamente. Se $\phi(\lambda | \underline{\theta})$ for uma distribuição Gama, por exemplo, com parâmetros α e β , tem-se uma verossimilhança Gama-Poisson:

$$L(k_i, T_i | \alpha, \beta) = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda T_i)^{k_i}}{k_i!} e^{-\lambda T_i} \frac{\lambda^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \beta^{\alpha} e^{-\beta \lambda} d\lambda = \frac{T_i^{k_i} \Gamma(\alpha + k_i) \beta^{\alpha}}{k_i! \Gamma(\alpha) (\beta + T_i)^{\alpha+k_i}} \quad (\text{Eq. 5.8})$$

Esta é a verossimilhança para a sub-população i . A Verossimilhança conjunta é dada, então, por:

¹¹ Os modelos de verossimilhança baseada em dados empíricos e em opinião de especialistas ilustrados aqui estão bem detalhados em Droguett e Mosleh (2005)

$$L\{(k_i, T_i) | i = 1, \dots, N | \alpha, \beta\} = \prod_{i=1}^N L(k_i, T_i | \alpha, \beta) \quad (\text{Eq. 5.9})$$

$$L\{(k_i, T_i) | i = 1, \dots, N | \alpha, \beta\} = \frac{\beta^{N\alpha}}{[\Gamma(\alpha)]^N} \prod_{i=1}^N \frac{T_i^{k_i}}{k_i!} \frac{\Gamma(\alpha + k_i)}{(\beta + T_i)^{\alpha + k_i}} \quad (\text{Eq. 5.10})$$

Outra escolha possível para a variabilidade populacional é uma distribuição Lognormal com parâmetros μ e σ , resultando em uma verossimilhança Lognormal-Poisson:

$$\begin{aligned} L(k_i, T_i | \mu, \sigma) &= \int_0^\infty \frac{(\lambda T_i)^{k_i}}{k_i!} e^{-\lambda T_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \lambda - \ln \mu}{\sigma}\right)^2} d\lambda \\ &= \frac{T_i^{k_i}}{k_i! \sqrt{2\pi\lambda\sigma}} \int_0^\infty \lambda^{k_i-1} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \lambda - \ln \mu}{\sigma}\right)^2 - \lambda T_i} d\lambda \end{aligned} \quad (\text{Eq. 5.11})$$

A evidência pode ser também constituída de dados do tipo quantidade de falhas por quantidade de demandas, $\{(k_i, D_i), i=1\dots n\}$, onde D_i é a quantidade de demandas da i -ésima amostra. Utilizando a distribuição binomial para calcular a probabilidade de observar k_i falhas em D_i tem-se:

$$P(k_i, D_i | p) = \binom{D_i}{k_i} p^{k_i} (1-p)^{D_i-k_i} \quad (\text{Eq. 5.12})$$

Para eliminar a condicionalidade em p :

$$L(k_i, D_i | \underline{\theta}) = \int_0^1 \binom{D_i}{k_i} p^{k_i} (1-p)^{D_i-k_i} \phi(p | \underline{\theta}) dp \quad (\text{Eq. 5.13})$$

Se a variabilidade for representada por uma distribuição Beta com parâmetros α e β , tem-se uma verossimilhança beta-binomial:

$$\begin{aligned} L(k_i, D_i | \alpha, \beta) &= \int_0^1 \binom{D_i}{k_i} p^{k_i} (1-p)^{D_i-k_i} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} p^{\alpha-1} (1-p)^{\beta-1} dp \\ &= \binom{D_i}{k_i} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \frac{\Gamma(\alpha + k_i)\Gamma(\beta + D_i - k_i)}{\Gamma(\alpha + \beta + D_i)} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 5.14})$$

ii) Verossimilhança baseada em opiniões de especialistas

Neste caso, a evidência disponível é do tipo $\{(\lambda_i, \sigma_i), i=1...n\}$ onde λ_i é a opinião fornecida pelo especialista i , σ_i é desvio padrão logarítmico de λ_i representando a incerteza do especialista i , e n é quantidade total de especialistas. σ_i , assim, pode ser interpretado como a confiança do analista no i -ésimo especialista.

Sabendo a taxa de falha λ_i de cada amostra, pode ser utilizada a distribuição Lognormal com mediana $\ln \lambda$ para cálculo da probabilidade de observar λ_i :

$$L(\lambda_i, \sigma_i | \lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lambda_i\sigma_i} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \lambda_i - \ln \lambda}{\sigma_i}\right)^2} \quad (\text{Eq. 5.15})$$

A probabilidade condicionada aos parâmetros μ e σ é calculada integrando-se a verossimilhança sobre todos os valores de λ :

$$L(\lambda_i, \sigma_i | \mu, \sigma) = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lambda_i\sigma_i} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \lambda_i - \ln \lambda}{\sigma_i}\right)^2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lambda\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \lambda - \ln \mu}{\sigma}\right)^2} d\lambda \quad (\text{Eq. 5.16})$$

onde foi considerado que a variabilidade populacional é representada por uma distribuição Lognormal com parâmetros μ e σ , conforme Equação 5.17.

$$\phi(\lambda | \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lambda\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \lambda - \ln \mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{Eq. 5.17})$$

A Equação 5.16 é resolvida, gerando uma verossimilhança Lognormal-Lognormal:

$$L(\lambda_i, \sigma_i | \mu, \sigma) = \frac{i}{\sqrt{\frac{1}{\sigma_i^2} + \frac{1}{\sigma^2}}} \frac{e^{-\frac{1}{2}\frac{(\ln \lambda_i - \ln \mu)^2}{\sigma^2 + \sigma_i^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2\sigma\lambda_i}} \quad (\text{Eq. 5.18})$$

iii) Verossimilhança mista¹²

No caso da verossimilhança mista, a evidência é composta de dados do tipo (k_i, T_i) ou (k_i, D_i) assim como de opiniões de especialistas (λ_i, σ_i) .

A Tabela 5.1 mostra os modelos de probabilidade utilizados para a verossimilhança mista, de acordo com a combinação das diferentes medidas de confiabilidade e diferentes formas de exposição dos dados.

¹² O modelo de verossimilhança mista explicado aqui está desenvolvido em Droguett, Groen e Mosleh, (2003).

Tabela 5.1: Modelos de verossimilhança mista

	(k_i, t_i)	(λ_i, σ_i)	(k_i, d_i)
Gama	Gama-Poisson-Lognormal		
Lognormal	Lognormal-Poisson-Lognormal		
		Lognormal-Binomial-Lognormal	
Beta		Beta-Binomial-Lognormal	

Fonte: Droguett, Groen e Mosleh (2003)

Assim, para evidências compostas de dados de falha por tempo (k_i, t_i) e por opiniões de especialistas (λ_i, σ_i) tem-se que, para a variabilidade populacional modelada por uma distribuição Lognormal, a verossimilhança é do tipo Poisson-Lognormal, ou seja, é composta por uma distribuição de Poisson para modelar os dados empíricos e uma distribuição Lognormal para modelar as opiniões de especialistas. Este modelo está detalhado matematicamente abaixo. Os demais seguem a mesma lógica para o desenvolvimento matemático.

Lognormal-Poisson-Lognormal

Para avaliar a variação populacional da taxa de falha de um determinado item, λ , sejam as fontes de evidências disponíveis do tipo quantidade de falhas por tempo de execução $\{(k_i, t_i), i = 1, \dots, n\}$ (E1) e estimativas sobre a incógnita Λ dadas por diferentes fontes (λ_i^*, σ_i) (E2). O conjunto de evidências genéricas é, portanto formado $\{(E1_i, E2_i), i=1\dots n\}$, onde i representa cada sistema do qual a informação é proveniente. Sendo a variabilidade populacional da incógnita Λ dada por uma distribuição Lognormal com média v e variância τ :

$$\phi(\lambda|v, \tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda\tau}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \lambda - v}{\tau} \right)^2 \right] \quad (\text{Eq. 5.19})$$

a distribuição de variabilidade dos parâmetros a posteriori, $\pi(\underline{\theta}|E)$ da Equação 5.2, pode ser escrita para os parâmetros v, τ e para um conjunto de evidências E_1 e E_2 como:

$$\pi(v, \tau|E_1, E_2) = \frac{P(E_1, E_2|v, \tau) \pi_0(v, \tau)}{\int_v \int_\tau P(E_1, E_2|v, \tau) \pi_0(v, \tau) dv d\tau} \quad (\text{Eq. 5.20})$$

Para o i -ésimo sistema, a probabilidade de informação do tipo E_1 , $P(E_{1i}|\underline{\theta})$, pode ser construída como explicado a seguir. Se a taxa de falha $\lambda_i = \lambda$ de cada

sistema é conhecida, pode-se usar a distribuição de Poisson para estimar a probabilidade de serem observadas k_i falhas em T_i :

$$P(k_i|t_i, \lambda) = \frac{(\lambda t_i)^{k_i} e^{-\lambda t_i}}{\Gamma(k_i + 1)} \quad (\text{Eq. 5.21})$$

Seguindo o modelo de erro multiplicativo proposto por Mosleh (1992), a verossimilhança para a estimativa da i -ésima fonte, $P(E_{2i}|\underline{\theta})$, pode ser escrita em termos de uma distribuição Lognormal com mediana $\ln \lambda$, i.e.

$$P(\lambda_i^*|\sigma_i, \lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i\lambda_i^*} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \lambda_i^* - \ln \lambda}{\sigma_i} \right)^2 \right] \quad (\text{Eq. 5.22})$$

Se for considerada a transformação $\mu_i = \ln \lambda_i^*$, pode-se então escrever a Equação 5.22 como

$$P(\mu_i|\sigma_i, \lambda) = P(\lambda_i^*|\sigma_i, \lambda) \left| \frac{d\lambda_i^*}{d\mu_i} \right| \quad (\text{Eq. 5.23})$$

e dado que $|d\lambda_i^*/d\mu_i| = e^{\mu_i}$, então

$$P(\mu_i|\sigma_i, \lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i e^{\mu_i}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\mu_i - \ln \lambda}{\sigma_i} \right)^2 \right] e^{\mu_i} \quad (\text{Eq. 5.24})$$

portanto

$$P(\mu_i|\sigma_i, \lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\mu_i - \ln \lambda}{\sigma_i} \right)^2 \right] \quad (\text{Eq. 5.25})$$

que é uma distribuição normal com a média igual a λ .

Como é sabido apenas que λ é um dos possíveis valores para a taxa de falha representada pela própria distribuição de variabilidade populacional $\phi(\lambda|\underline{\theta})$, integra-se a probabilidade dada pela Equação 5.4 sobre todos os possíveis valores de λ , de modo a calcular a probabilidade dos dados de forma incondicional em relação ao valor desconhecido de λ

$$P(k_i, t_i, \mu_i, \sigma_i|v, \tau) = P_i = \int_{\lambda} P(k_i|t_i, \lambda, E_0) P(\mu_i|\sigma_i, \lambda) \phi(\lambda|v, \tau) d\lambda \quad (\text{Eq. 5.26})$$

Em que foram considerados evidências do tipo (k_i, t_i) e (λ_i^*, σ_i) como independentes. Nota-se ainda que a i -ésima estimativa de especialista λ_i^* ocorre para o mesmo i -ésimo sistema para o qual foram observados dados em tempo de execução (k_i, t_i) .

Substituindo as Equações 5.19 e 5.25 na Equação 5.26:

$$P_i = \int_{\lambda} P(k_i | t_i, \lambda) \frac{1}{2\pi\sigma_i\tau\lambda} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\mu_i - \ln \lambda}{\sigma_i} \right)^2 + \left(\frac{\ln \lambda - v}{\tau} \right)^2 \right] \right\} d\lambda \quad (\text{Eq. 5.27})$$

Uma possível solução para Equação 5.27 pode ser obtida se

$$\exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\mu_i - \ln \lambda}{\sigma_i} \right)^2 + \left(\frac{\ln \lambda - v}{\tau} \right)^2 \right] \right\} \quad (\text{Eq. 5.28})$$

for escrito como

$$\exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\mu'_i - \ln \lambda}{\sigma'_i} \right)^2 \right] \quad (\text{Eq. 5.29})$$

pode-se ainda observar que

$$\sigma'_i = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\tau^2} + \frac{1}{\sigma_i^2}}} \text{ e } \mu'_i = \frac{\frac{v}{\tau^2} + \frac{\mu_i}{\sigma_i^2}}{\frac{1}{\tau^2} + \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (\text{Eq. 5.30})$$

Portanto, a verossimilhança dada pela Equação 5.27 é

$$P_i = \int_{\lambda} \frac{(\lambda t_i)^{k_i} e^{-t_i \lambda}}{\Gamma(k_i + 1)} \frac{1}{2\pi\sigma_i\tau\lambda} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\mu'_i - \ln \lambda}{\sigma'_i} \right)^2 + \frac{(\mu_i - v)^2}{\sigma'_i + \tau^2} \right] \right\} d\lambda \quad (\text{Eq. 5.31})$$

que após alguma manipulação algébrica torna-se

$$P_i = \frac{\exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(\mu_i - v)^2}{\sigma_i^2 + \tau^2} \right]}{2\pi\sigma_i\tau} \int_{\lambda} \frac{t_i^{k_i} \lambda^{k_i-1} e^{-t_i \lambda}}{\Gamma(k_i + 1)} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\mu'_i - \ln \lambda}{\sigma'_i} \right)^2 \right] d\lambda \quad (\text{Eq. 5.32})$$

Pode-se notar que é possível escrever a equação anterior com o produto entre uma distribuição Gama e uma distribuição Lognormal.

$$I = \frac{\sigma'_i \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(\mu_i - v)^2}{\sigma_i'^2 + \tau^2}\right)}{\sqrt{2\pi} \sigma_i \tau t_i} \int_{\lambda} \frac{t_i^{k_i+1} \lambda^{(k_i+1)-1} e^{-t_i \lambda}}{\Gamma(k_i + 1)} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma'_i \lambda} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\mu'_i - \ln \lambda}{\sigma'_i}\right)^2\right] d\lambda \quad (\text{Eq. 5.33})$$

Substituindo as expressões por μ'_i e σ'_i dados pela Equação 5.30, tem-se

$$P_i = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(\mu_i - v)^2}{\sigma_i'^2 + \tau^2}\right)}{\sqrt{2\pi} \sigma_i \tau t_i \sqrt{\frac{1}{\sigma_i'^2} + \frac{1}{\tau^2}}} \int_{\lambda} \text{Ga}(\lambda | k_i + 1, t_i) \text{LN}\left(\lambda \left| \frac{\frac{v}{\tau^2} + \frac{\mu_i}{\sigma_i'^2}}{\frac{1}{\sigma_i'^2} + \frac{1}{\tau^2}}, \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\tau^2} + \frac{1}{\sigma_i'^2}}} \right.\right) d\lambda \quad (\text{Eq. 5.34})$$

A verossimilhança total é obtida substituindo-se a Equação 5.30 na Equação abaixo:

$$P(E_1, E_2 | \underline{\theta}) = \prod_{i=1}^n P(E_{1i} | \underline{\theta}) P(E_{2i} | \underline{\theta}) = \prod_{i=1}^n P_i \quad (\text{Eq. 5.35})$$

5.1.3 Variabilidade populacional

Calculada a distribuição de probabilidade dos parâmetros $\pi(\underline{\theta} | E)$, tem-se o modelo da variabilidade de λ , $\phi(\lambda | \underline{\theta})$ e pode-se então obter a função densidade de variabilidade média ou esperada do parâmetro x . Esta estimativa é calculada integrando-se $\phi(\lambda | \underline{\theta})$ usando $\pi(\underline{\theta})$ como peso:

$$\hat{p}(x) = \int \dots \int_{\theta_1, \dots, \theta_n} \phi(x | \theta_1, \dots, \theta_n) \pi(\theta_1, \dots, \theta_n) d\theta_1 \dots d\theta_n \quad (\text{Eq. 5.36})$$

A função densidade esperada consiste então de uma mistura ponderada de distribuições do modelo escolhido. A média estimada da distribuição da variabilidade populacional é obtida calculando-se a média da função densidade esperada:

$$\hat{\mu}_x = \int_x x \hat{p}(x) dx \quad (\text{Eq. 5.37})$$

De forma similar, a variância esperada é dada por:

$$\sigma_x^2 = \int_x (x - \hat{\mu}_x)^2 \hat{p}(x) dx \quad (\text{Eq. 5.38})$$

Além desses valores é possível estimar as distribuições de incerteza para medidas como a função densidade de variabilidade acumulada e os seus respectivos percentis. Estas distribuições fornecem um indicativo do grau de incerteza associado à variabilidade populacional, gerado pela quantidade limitada de conhecimento sobre as populações consideradas.

A Figura 5.5 ilustra essas distribuições: 5.5a mostra a densidade conjunta dos parâmetros θ_1, θ_2 da variabilidade populacional. Para cada par θ_1, θ_2 tem-se uma distribuição $\phi(x|\theta_1, \theta_2)$, representadas pelas linhas mais finas em 5.5b. A distribuição esperada da variabilidade populacional é representada pela linha mais grossa, enquanto a linha pontilhada representa a distribuição das médias. Em 5.5c tem-se a distribuição acumulada da variabilidade populacional esperada $\hat{P}(x)$, em linha sólida. Este valor é interpretado como a fração estimada de populações cujo valor de X é menor ou igual a x . As curvas pontilhadas mostram o grau de incerteza sobre este valor na forma de curvas percentis $P_\alpha(x)$, construída plotando-se a α -percentil das distribuições $\pi(P(x))$, calculadas para cada x .

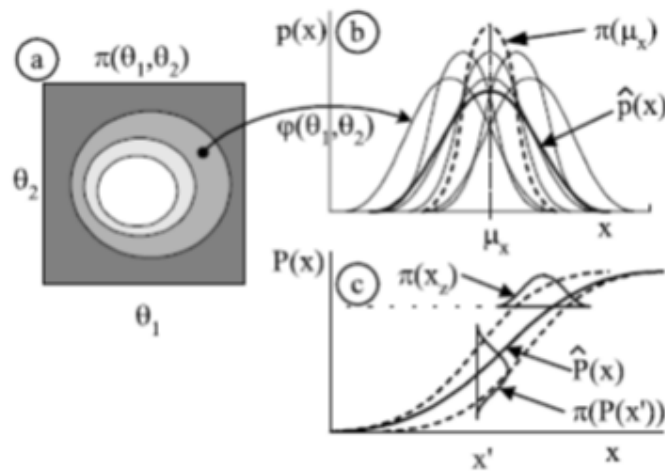


Figura 5.5: Resultados das estimativas da variabilidade populacional

5.2 Segundo Estágio

O segundo estágio da análise Bayesiana em dois estágios consiste na aplicação convencional do teorema de Bayes.

Sendo E_3 a evidência proveniente da planta em questão, e E_1 e E_2 as evidências de quantidade de falhas por tempo e opinião de especialista proveniente dos dados genéricos, a distribuição a posteriori da taxa de falha Λ será (KAPLAN,1983):

$$P(\Lambda|E_1, E_2, E_3) = p(\Lambda|E_1 E_2) \left[\frac{p(E_3|\Lambda, E_1, E_2)}{p(E_3|E_1, E_2)} \right] \quad (\text{Eq. 5.39})$$

em que $p(\Lambda|E_1 E_2)$ representa o que se conhece da taxa de falha antes de obter a evidência específica da planta, mas depois de obter-se as evidências E_1 e E_2 . Essa é a distribuição a priori de Λ do segundo estágio, e corresponde à distribuição a posteriori obtida no primeiro estágio.

A metodologia desenvolvida neste capítulo, juntamente com as etapas de AQR explicitadas no Capítulo 3, foi aplicada para um terminal offshore de GNL, no Capítulo 6.

Capítulo 6: Aplicação da Metodologia em Terminal Offshore no Porto de Suape

A metodologia proposta de Análise Quantitativa de Risco envolvendo Análise Bayesiana Não-Homogênea foi aplicada a um hipotético terminal offshore de Gás Natural Liquefeito no Porto de Suape. Este capítulo apresenta as premissas adotadas, os resultados das análises de consequência e frequência e, finalmente, o risco individual gerado pelos possíveis acidentes no terminal.

O Porto de Suape, devido a sua localização privilegiada, quantidade de indústrias instaladas e demanda da região por gás natural, é um importante e promissor local para instalação de um terminal de estocagem e regaseificação de Gás Natural Liquefeito. Por estes motivos, o Porto de Suape foi escolhido para o estudo de caso e a aplicação da Metodologia Bayesiana de AQR para Terminais Offshore de GNL, desenvolvida no Capítulo 5 e ilustrada na Figura 5.1. Seguindo a tendência mundial explicitada no Capítulo 2, o terminal é considerado do tipo FSRU.

O esquema básico do processo de recebimento, estocagem e regaseificação do GNL ilustrado na Figura 2.7 pode ser ampliado e detalhado, de modo a gerar o fluxograma de processo exposto na Figura 6.1. Apesar do terminal analisado ser offshore, utilizou-se o fluxograma de processo de um terminal onshore, considerando-se que tal aproximação não afetará significativamente a análise realizada. As condições de operação e os diâmetros foram estimadas de acordo com estudos de terminais de GNL já existentes e opiniões de especialistas. As etapas de análise de consequências e análise de frequências estão desenvolvidas abaixo, seguidas do cálculo do risco individual.

A análise de frequências foi realizada até o primeiro estágio da Análise Bayesiana em Dois Estágios, já que o terminal considerado é hipotético e portanto não possui dados “específicos” de falhas de equipamentos. Esta situação é típica de AQR de plantas em fase de concepção onde não há experiência operacional.

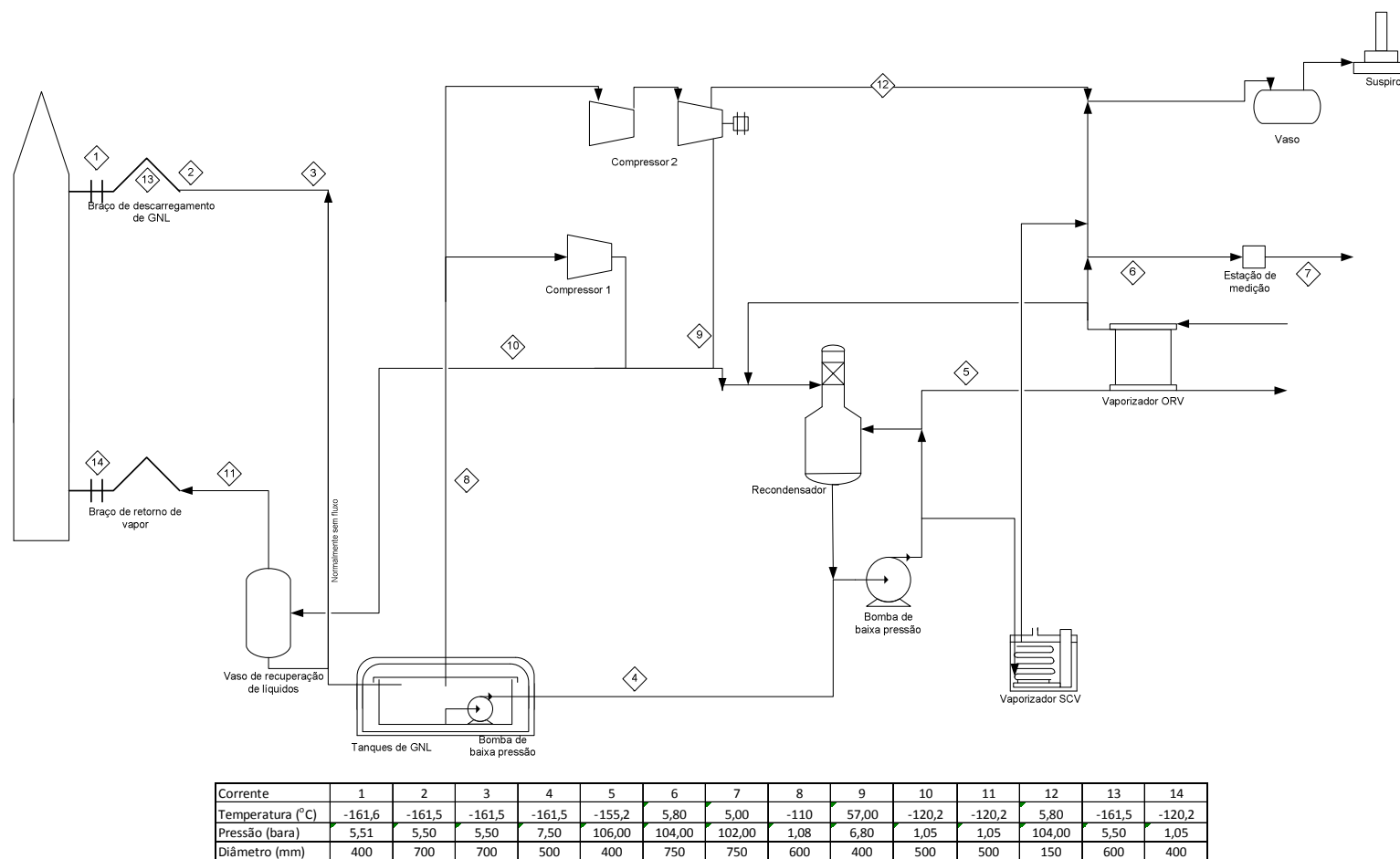


Figura 6.1: Fluxograma de processo de recebimento, armazenamento e regaseificação de GNL no terminal offshore

6.1 Análise de Consequências

Seguindo a metodologia proposta no Seção 3.2 do Capítulo 3 deste trabalho, e a partir do fluxograma da Figura 6.1, é possível elaborar a Análise Preliminar de Perigo, identificando os trechos de possíveis vazamentos, além de suas causas, consequências e sua classificação quanto à severidade. As APPs geradas nesta etapa qualitativa encontram-se no Apêndice 6.1.

Nas APPs foram identificados, ao todos, 44 cenários, entre vazamentos em linha e ruptura de equipamentos. A distribuição de classificação destes cenários em relação à severidade pode ser vista no gráfico da Figura 6.2 abaixo. Percebe-se que a maioria dos cenários é de severidade II e III, enquanto a menor parte é de severidade I. Vale ressaltar que esta é uma etapa qualitativa, baseada na opinião do analista e de especialistas.

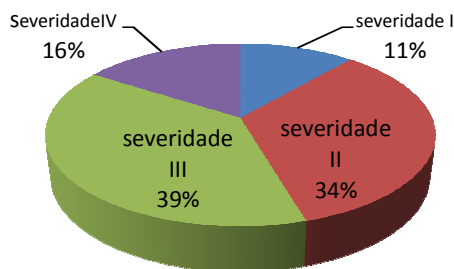


Figura 6.2: distribuição dos cenários quanto à sua severidade

Seguindo a metodologia proposta no Capítulo 3, para a simulação foram selecionados cenários representativos dentre os de severidade III e IV, de acordo com as condições de processo. Os cenários representativos, que constituem os Eventos Iniciadores– Els, assim como suas características (comprimento – L e diâmetro – D) e condições de operação (Pressão – P e temperatura – T) e a massa total vazada, podem ser vistos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Características dos Eventos Iniciadores

El	Cenário	Perigo	Trecho	L (m)	D (mm)	P (bara)	T (oC)	Massa total vazada (kg)
01	2	Grande liberação de Gás Natural Liquefeito	Braço de descarregamento de GNL	20	400	5,51	-161,6	49920
02	6	Grande liberação de Gás Natural Liquefeito	Transferência de líquido da costa até os tanques de GNL	380	700	5,5	-161,5	353280
03	16	Grande liberação de Gás Natural	GN da estação de medição até o limite de bateria	500	750	102	5	503400
04	18	Grande liberação de Gás Natural	Transferência de vapor dos tanques de GNL até o compressor	450	600	1,08	-110	1389,6
05	40	Grande liberação de Gás Natural Liquefeito	Tubulação no cais entre as válvulas de emergência	120	600	5,5	-161,5	330720
06	44	Grande liberação de Gás Natural Liquefeito	Tanque de armazenamento de GNL	-	-	1,08	-161,5	11.664.000

A quantificação dos efeitos físicos decorrentes dos Eventos Iniciadores foi realizada através do *software* PHAST v.6.54¹³, um dos mais utilizados para simulação de consequências em análise de risco

Para os eventos iniciadores de 1 a 5, referentes a rupturas de linha, utilizou-se o modelo *line rupture*, que simula uma ruptura de linha conectada a vasos, tanques, etc., e para o evento iniciador 6 utilizou-se o modelo *catastrophic rupture*. Este modelo considera que o tanque é destruído por um impacto, fenda ou outro tipo de falha que se propague rapidamente e o inventário é liberado instantaneamente.

¹³ . Maiores informações sobre o PHAST podem ser encontradas no website da DNV - <http://www.dnv.com.br/services/software/products/safeti/safetiqlra/phast.asp>.

O foco da análise foram os incêndios em poça e em nuvem, considerados na literatura como as principais consequências de um vazamento de GNL (HAVENS;SPICER,2007).

Para a simulação foram adotadas as seguintes premissas:

i) Composição do GNL

Como a liquefação do Gás Natural envolve um pré-tratamento que remove possíveis impurezas, o GNL é constituído quase totalmente por metano. Assim, para a simulação, considerou-se uma composição de 100% metano.

ii) Local do vazamento

Com exceção dos braços de descarregamento de GNL e retorno de vapor, os cenários analisados se localizam na área de processo. A poça formada pelo vazamento poderia, portanto, ficar contida entre diques de contenção. Entretanto, pela impossibilidade de estimar a área dos possíveis diques e de forma a adotar uma abordagem mais conservativa, o vazamento foi considerado diretamente sobre a água, sem contenção.

iii) Tempo de vazamento

O tempo de vazamento compreende o tempo para que uma falha no sistema seja detectada e as válvulas sejam fechadas. Considerou-se que a planta possui um sistema de bloqueio automático, em que nenhum operador humano é necessário. Assim, de acordo com Purple Book CPR18E (2005), o tempo utilizado foi de 2 minutos.

No caso de falhas nos braços de carregamento/descarregamento, um menor tempo é considerado devido à presença de trabalhadores nas proximidades, que podem acionar o sistema de emergência. Neste caso, utilizou-se um tempo de 30 segundos.

iv) Condições meteorológicas e ambientais

As condições ambientais da região foram obtidas a partir do Estudo de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) da Refinaria Abreu e Lima (2006), localizada no Porto de Suape, e podem ser vistas na Tabela 6.2.

Os dados são resultado de três anos (2006-2008) de simulação numérica do modelo atmosférico de mesoescala MM5, e apresentam-se decompostos em período diurno (6 às 18h) e noturno (18h às 6h).

A Classe de Estabilidade refere-se à classificação da estabilidade atmosférica segundo Pasquill. A estabilidade atmosférica é a tendência que o ar atmosférico apresenta para diminuir ou aumentar o movimento vertical, ou alternativamente suprimir ou ampliar a turbulência existente. A classificação de Pasquill vai de A – extremamente instável a F – estável, passando por D – neutra.

Tabela 6.2: Informações meteorológicas médias para a região do Porto de Suape

Período	Velocidade do vento (m s^{-1})	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Classe de Estabilidade	Umidade Relativa (%)	Pressão (mb)
Dia	4,7	26,5	D	76,9	1008,0
Noite	4,5	26,4	E	77,6	1008,4

Fonte: EIA/RIMA RNEST (2006)

v) Valores de referência

Os limites adotados foram os estabelecidos pela norma técnica CETESB P4.261 (2003) e pelo Puple Book CPR18E (2005):

a. Radiação térmica:

- i. 3 kW/m^2 : início dos efeitos irreversíveis;
- ii. $12,5\text{ kW/m}^2$: 1% de fatalidade;
- iii. $37,5\text{ kW/m}^2$: 50% de fatalidade.

b. Incêndio em nuvem:

LII (Limite Inferior de Inflamabilidade): 100% de fatalidade.

Os resultados da análise de consequências estão agrupados nas Tabelas 6.3 a 6.8, com os alcances de vulnerabilidade para os incêndio em poça e em nuvem para cada Evento Iniciador para os períodos do dia e da noite. Os alcances dos incêndios em poça adiantado e retardado resultantes de um vazamento de GNL foram iguais, o que pode ser devido ao baixo tempo de vazamento. Assim, nas tabelas, os incêndios em poça retardado e adiantado estão representado pela consequência “incêndio em poça”. Os eventos EI03 e EI04 não resultam em formação de poça, pois estão na fase vapor.

Tabela 6.3: Alcances das consequências do Evento Iniciador 01

Evento Iniciador 01			
Consequência	Limite	Alcance (m)	
		Dia	Noite
Incêndio em Poça	3 kW/m ²	364,68	360,18
	12,5 kW/m ²	220,59	214,21
	37,5 kW/m ²	148,92	141,04
Incêndio em Nuvem	LII	900	2650

Tabela 6.4: Alcances das consequências do Evento Iniciador 02

Evento Iniciador 02			
Consequência	Limite	Alcance (m)	
		Dia	Noite
Incêndio em Poça	3 kW/m ²	624,74	625,53
	12,5 kW/m ²	363,96	365,02
	37,5 kW/m ²	231,99	232,4
Incêndio em Nuvem	LII	1300	4200

Tabela 6.5: Alcances das consequências do Evento Iniciador 03

Evento Iniciador 03			
Consequência	Limite	Alcance (m)	
		Dia	Noite
Incêndio em Poça	3 kW/m ²	-	-
	12,5 kW/m ²	-	-
	37,5 kW/m ²	-	-
Incêndio em Nuvem	LII	850	860

Tabela 6.6: Alcances das consequências do Evento Iniciador 04

Evento Iniciador 04			
Consequência	Limite	Alcance (m)	
		Dia	Noite
Incêndio em Poça	3 kW/m ²	-	-
	12,5 kW/m ²	-	-
	37,5 kW/m ²	-	-
Incêndio em Nuvem	LII	51	45

Tabela 6.7: Alcances das consequências do Evento Iniciador 05

Evento Iniciador 05			
Consequência	Limite	Alcance (m)	
		Dia	Noite
Incêndio em Poça	3 kW/m ²	607,83	607,73
	12,5 kW/m ²	356,78	355,84
	37,5 kW/m ²	229,89	227,73
Incêndio em Nuvem	LII	1330	4000

Tabela 6.8: Alcances das consequências do Evento Iniciador 06

Evento Iniciador 06			
Consequência	Limite	Alcance (m)	
		Dia	Noite
Incêndio em Poça	3 kW/m ²	1717,26	1714,66
	12,5 kW/m ²	993,41	990,03
	37,5 kW/m ²	613,03	607,99
Incêndio em Nuvem	LII	2320	6100

Como esperado, o Evento Iniciador EI06, que corresponde à ruptura do tanque de GNL, apresenta maiores alcances de vulnerabilidade, em especial por ser referente a um vazamento instantâneo de um grande inventário.

É possível observar que os alcances são maiores durante o período da noite, em especial pela condição de estabilidade atmosférica deste turno. Uma atmosfera mais estável (E) permite que a nuvem de Gás Natural viaje maiores distâncias, atingindo assim maior raio.

A partir dos resultados da análise de consequências, é possível estimar uma distância que o terminal deveria ter da costa. Sendo o maior alcance de vulnerabilidade igual a 6100m, referentes a um incêndio em nuvem causado pelo ruptura do tanque durante a noite, a distância pode ser estimada como 6km. Dessa forma, a posição do terminal pode ser considerada como a ilustrada na Figura 6.3. É importante considerar que essa distância é uma estimativa inicial, baseada apenas nos resultados dos cálculos de vulnerabilidade. Um terminal a essa distância da costa, na realidade, provavelmente não seria viável, pois a essa distância ele estaria sujeito condições marítimas mais extremas; além do alto custo que seria gerado por gasodutos com esse comprimento para levar o Gás do terminal à costa. Entretanto, esse valor será considerado, com as ressalvas explicitadas, para plotagem dos resultados da análise de risco.

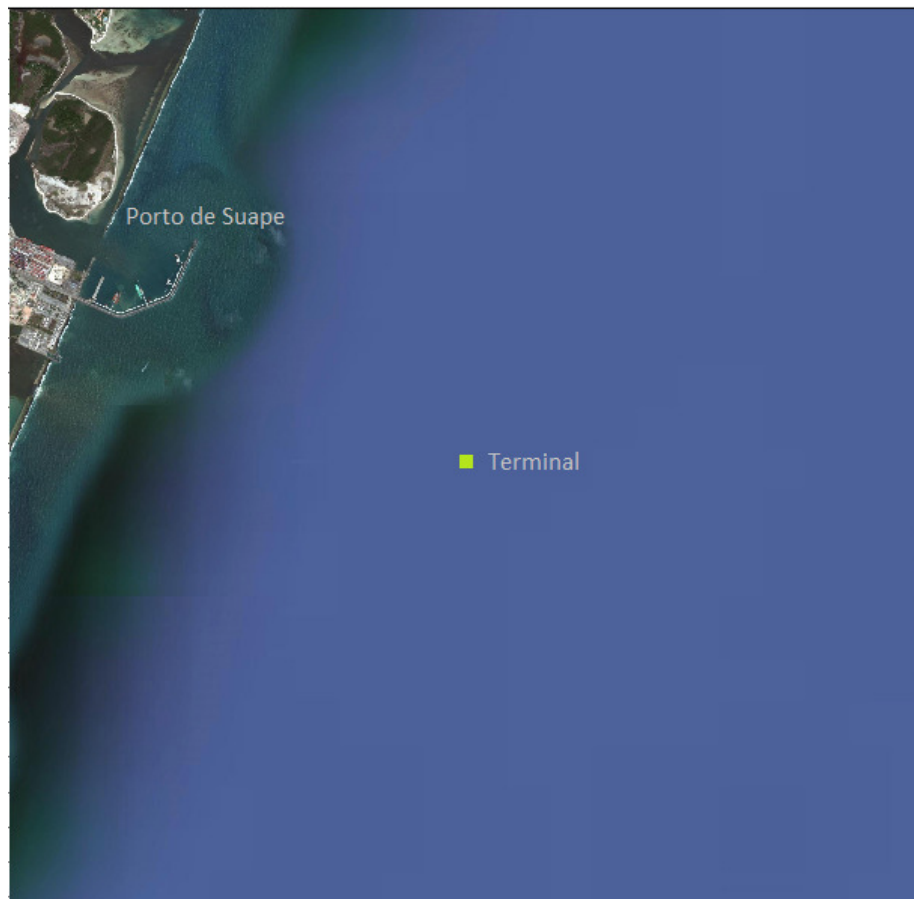


Figura 6.3: Posição do terminal considerado

6.2 Análise das Frequências

Conforme descrito no Capítulo 5, a indústria de Gás Natural Liquefeito, por ser relativamente recente, não possui dados específicos de falha de equipamentos e frequências de incidentes. Desta forma, alternativamente pode-se fazer uso de dados provenientes de bancos de dados de confiabilidade genéricos, não específico do GNL. As informações de bancos de dados genéricos podem ser utilizadas como evidências em uma análise Bayesiana para atualizar a incerteza inicial sobre a frequência de um evento. Como esses dados não são obtidos nas mesmas condições de operação, o conjunto de evidências é constituído de sub-populações heterogêneas entre si, levando à necessidade de que seja efetuada uma análise Bayesiana não-homogênea, conforme descrito no Capítulo 5. Esta análise, em que é calculada a distribuição da variabilidade populacional do parâmetro de interesse, é a primeira etapa da análise

Bayesiana em dois estágios. A frequência a posteriori obtida pode ser utilizada como sendo frequência a priori na segunda etapa da análise.

Para a determinação das frequências dos Eventos Iniciadores através de uma análise Bayesiana de Dois Estágios são necessários dados “genéricos” e “específicos”. Entretanto, como se trata de um terminal hipotético, ainda não existem dados específicos de falhas. Assim, a análise de frequências se limitará ao primeiro estágio da metodologia – a análise de variabilidade populacional.

A especificação da distribuição a priori e as evidências para construção da verossimilhança deste estágio estão descritas nas seções abaixo, seguidas dos resultados da análise para cada Evento Iniciador.

6.2.1 Distribuição a Priori

É importante ressaltar que a distribuição a priori na primeira etapa da Análise Bayesiana representa a incerteza inicial sobre a variabilidade populacional, e não sobre o parâmetro de interesse (frequência do evento), ao contrário do que ocorre na segunda etapa da análise.

Com o intuito de fazer com que a distribuição a posteriori reflita principalmente as evidências coletadas, escolheu-se utilizar uma distribuição a priori não informativa. A distribuição a priori escolhida foi a distribuição lognormal com fator de erro α igual a 100, de forma que ela terá pouco ou nenhum impacto sobre a distribuição a posteriori, ou seja, tem-se uma distribuição com elevada variância e, portanto, difusa. Para localizar a distribuição a priori em torno da média das estimativas obtidas pelos especialistas, a mediana da distribuição a priori foi estabelecida como sendo a média das frequências dos dados das evidências.

6.2.2 Evidências

Nesta pesquisa foram utilizados diversos banco de dados de falha genéricos, previamente estabelecidos por diversos autores e estudos. Alguns deles estão explicitados abaixo:

- a) Desenvolvimento de um Banco de Dados de Taxas de Falhas de Plantas de GNL Aprimorado¹⁴

Johnson e Welker (1981) elaboraram um banco de dados a partir da história de 27 instalações de GNL, divulgado no estudo *Development of an Improved LNG Plant Failure Rate Data Base* (1981). O banco de dados fornece o tempo de operação dos equipamentos, o número de falhas observadas e o tempo médio entre as falhas.

- b) *Guidelines for Quantitative Risk Assessment (Purple Book)*

O Purple Book CPR18E (2005) é um dos livros coloridos da TNO (*Netherlands Organization for Applied Scientific Research*), uma organização holandesa de pesquisas independente. Os livros coloridos são utilizados em todo o mundo como referência para a análise de risco e cada um deles refere-se a uma etapa da análise. O *Purple Book* fornece frequências de falhas de eventos envolvendo perda de inventário para diversos sistemas.

- c) Estudo COVO

O estudo COVO (1982) foi uma análise de risco de seis instalações potencialmente perigosas em Rijnmond, Holanda, e gerou opiniões de especialistas sobre taxas de falhas de diversos equipamentos.

- d) Guia dos Dados de Confiabilidade de Equipamentos de Processo¹⁵

O Centro de Segurança de Processos Químicos (CCPS), parte do Instituto Americano de Engenheiros Químicos (AIChE), foi criado em 1985 para intensificar o desenvolvimento e disseminação das práticas dos engenheiros para prevenção e mitigação de incidentes catastróficos envolvendo materiais perigosos. O Guia de Dados de Confiabilidade de Equipamentos de Processo - *Guidelines for Process Equipment Reliability Data* (1989) - , desenvolvido pela CCPS, reúne dados de diversos estudos de confiabilidade de equipamentos de processo.

Um agrupamento dos dados dos Bancos de Dados pertinentes a este estudo pode ser visto na Tabela 6.9 abaixo. Notar que nos casos de ruptura de linha a

¹⁴ Para simplificar, este banco de dados será referenciado como “LNG” no restante da dissertação.

¹⁵ Este banco de dados será referenciado como CCPS no restante da dissertação

frequência pode depender do diâmetro D da tubulação, conforme mostrado na coluna Observação.

Tabela 6.9: Dados de falhas dos diversos bancos de dados utilizados

Evento	Banco de Dados	Tempo de operação	Falhas	Frequência	Observação
Ruptura de braço	HFF ¹⁶	-	-	$3 \times 10^{-8} \text{ hora}^{-1}$	
Ruptura de Braço	COVO	-	-	$4,05 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$	
Ruptura de linha	LNG	$1,16 \times 10^9 \text{ horas}$	2	-	
Ruptura de linha	Hawskley	-	-	$3,00 \times 10^{-8} \text{ ano}^{-1} \text{ m}^{-1}$	$500\text{mm} < D < 750\text{mm}$
Ruptura de linha	Hawskley	-	-	$5,00 \times 10^{-8} \text{ ano}^{-1} \text{ m}^{-1}$	$150\text{mm} < D < 500\text{mm}$
Ruptura de linha	Purple Book	-	-	$1,00 \times 10^{-7} \text{ ano}^{-1} \text{ m}^{-1}$	$D > 150\text{mm}$
Ruptura de linha	COVO	-	-	$8,80 \times 10^{-8} \text{ hora}^{-1} \text{ m}^{-1}$	$D > 150\text{mm}$
Ruptura de linha	CCPS	-	-	$2,68 \times 10^{-8} \text{ milha}^{-1} \text{ hora}^{-1}$	
Ruptura de tanque	Purple Book	-	-	$1,00 \times 10^{-8} \text{ ano}^{-1}$	
Ruptura de tanque	CCPS	-	-	$9,85 \times 10^{-7} \text{ ano}^{-1}$	Tanque atmosférico metálico

A análise foi realizada através do software R-DAT Plus v1.5¹⁷, software desenvolvido especialmente para a realização de análise Bayesianas no contexto da análise de risco.

Os valores de frequência e falhas obtidos nos Bancos de Dados foram utilizados na verossimilhança na análise Bayesiana. Como pode ser visto na Tabela 6.9, no caso de ruptura de linha as evidências coletadas formam uma base de dados mista,

¹⁶ *Handbook Failure Frequencies 2009 for drawing up a safety report*, Flemish Government (2009)

¹⁷ Maiores informações sobre o software podem ser encontradas em <http://www.prediction-technology.com/products/risk.htm>.

contendo dados de quantidade de falhas por determinado tempo de operação, no caso do banco de dados LNG, e estimativas de frequências de falhas, nos demais bancos de dados. Dessa forma, o modelo estatístico utilizado nestes eventos foi o de Lognormal-Poisson-Lognormal, conforme explicitado na Tabela 5.1. Nos casos de ruptura de tanque e ruptura do braço de descarregamento de GNL, cujas evidências são compostas apenas de opinião de especialistas (estimativas das frequências) o modelo utilizado foi lognormal-lognormal, ou seja, sem a componente Poisson correspondendo aos dados empíricos.

6.2.3 Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados do cálculo de frequências dos Eventos Iniciadores realizado através da análise Bayesiana. De forma a tornar a discussão mais objetiva, apenas os resultados para o Evento Iniciador 01 são detalhados na seção, enquanto que a distribuição dos parâmetros da variabilidade populacional e a distribuição acumulada esperada da variabilidade populacional dos demais eventos encontram-se no Apêndice 6.2.

i) Evento Iniciador 01

O Evento Iniciador EI01 refere-se à ruptura do braço de descarregamento de Gás Natural Liquefeito do navio provedor para o terminal. A Tabela 6.10 apresenta os dados utilizados como evidências para cálculo da distribuição a posteriori do EI01. A mediana μ da distribuição a priori utilizada foi de $1,52 \times 10^{-4} \text{ ano}^{-1}$.

Tabela 6.10: Dados utilizados como evidências no EI01

Banco de Dados	Tempo de Operação (ano)	Falhas	Frequência (ano^{-1})
HFF	-	-	$2,63 \times 10^{-4}$
COVO	-	-	$4,05 \times 10^{-5}$

O primeiro passo da análise é a obtenção da distribuição conjunta de probabilidade dos parâmetros mediana e fator de erro da variabilidade populacional $\pi(\mu, \alpha|E)$, ilustrada na Figura 6.4.

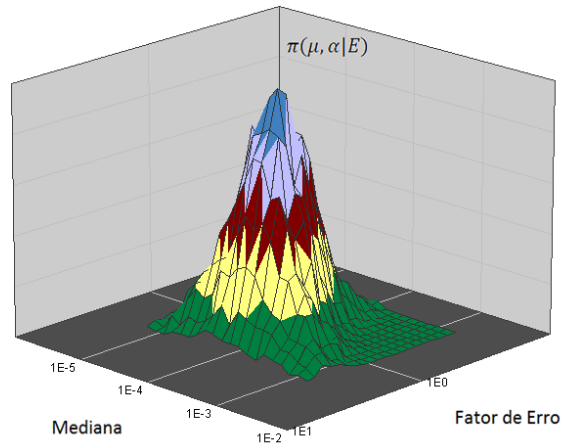


Figura 6.4: Distribuição dos parâmetros da variabilidade populacional do EI01

Na Figura 6.4 pode-se observar que o fator de erro varia de zero a aproximadamente dez, evidenciando uma considerável incerteza na distribuição a posteriori dos parâmetros da distribuição da variabilidade populacional.

Com a distribuição conjunta dos parâmetros da variabilidade populacional $\pi(\mu, EF|E)$ e a distribuição lognormal da variabilidade $\phi(p|\mu, \sigma)$, a distribuição esperada da variabilidade populacional da frequência do EI01 pode ser estimada através da equação 4.13:

$$\bar{\phi}(\lambda) = \int_{\theta_1} \dots \int_{\theta_m} \phi(\lambda|\theta_1 \dots \theta_m) \pi(\theta_1 \dots \theta_m|E) d\theta_1 \dots \theta_m \quad (\text{Eq. 4.13})$$

na forma:

$$\bar{\phi}(\lambda) = \int_{\mu} \int_{\alpha} \phi(\lambda|\mu, \alpha) \cdot \pi(\mu, \alpha) d\mu d\alpha$$

A distribuição acumulada e a função densidade de probabilidade da variabilidade populacional esperada podem ser vistas nas Figuras 6.5 e 6.6, respectivamente.

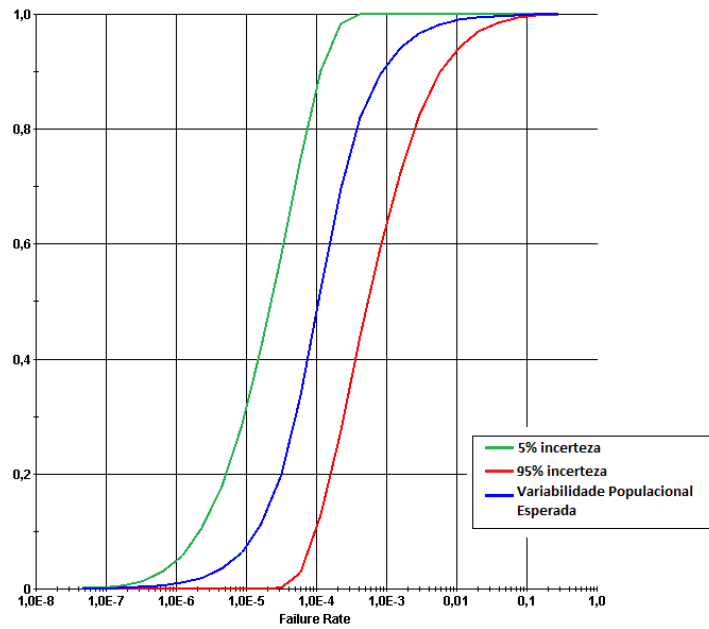


Figura 6.5: Distribuição acumulada esperada da variabilidade populacional da frequência do Evento Iniciador EI01

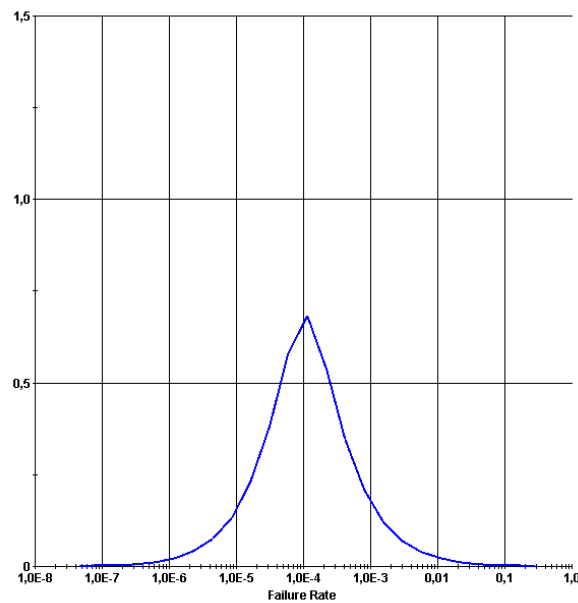


Figura 6.6: Função densidade de probabilidade da variabilidade populacional esperada das frequências do Evento Iniciador EI01

Na Figura 6.5 é possível ver que o intervalo de probabilidade – distância entre as curvas de 5% e 95% de confiança – é significativamente extenso, resultado da quantidade limitada de evidência utilizadas para a verossimilhança, o que vem a

corroborar o resultado encontrado para a distribuição a posteriori dos parâmetros da variabilidade populacional mostrada na Figura 6.4.

A Tabela 6.11 apresenta os valores para as curvas da média e de 5%, 50% e 95% de probabilidade para a variabilidade populacional da frequência do evento.

Tem-se, assim, que a frequência do Evento EI01, determinada pela média da distribuição esperada da variabilidade populacional, é igual a $2,15 \times 10^{-3} \text{ano}^{-1}$.

Tabela 6.11: Média e curvas percentuais da distribuição de variabilidade da frequência do EI01

Valor	Média	Curva de 5%	Curva de 50%	Curva de 95%
Média	$2,15 \times 10^{-3}$			
Variância	$3,23 \times 10^4$			
1st	$1,18 \times 10^{-6}$	$4,51 \times 10^{-5}$	$6,37 \times 10^{-6}$	$2,53 \times 10^{-7}$
5th	$6,65 \times 10^{-6}$	$7,26 \times 10^{-5}$	$1,51 \times 10^{-5}$	$1,05 \times 10^{-6}$
10th	$1,43 \times 10^{-5}$	$9,97 \times 10^{-5}$	$2,38 \times 10^{-5}$	$2,19 \times 10^{-6}$
50th	$1,08 \times 10^{-4}$	$5,45 \times 10^{-4}$	$1,09 \times 10^{-4}$	$2,28 \times 10^{-5}$
90th	$8,58 \times 10^{-4} \text{E-04}$	$5,88 \times 10^{-3}$	$4,94 \times 10^{-4}$	$1,15 \times 10^{-4}$
95th	$1,89 \times 10^{-3} \text{E-03}$	0,0126	$7,68 \times 10^{-4}$	$1,56 \times 10^{-4}$
99th	0,0112	0,0543	$1,81 \times 10^{-3}$	$2,53 \times 10^{-4}$

ii) Evento Iniciador 02

O Evento Iniciador EI02 corresponde à ruptura da linha de entrada de Gás Natural Liquefeito proveniente do navio provedor nos tanques de GNL do terminal. A Tabela 6.12 apresenta os dados utilizados como evidências para cálculo da distribuição a posteriori do EI02. A mediana μ da distribuição a priori utilizada foi de $3,05 \times 10^{-5} \text{ano}^{-1}$.

Tabela 6.12: Dados utilizados como evidências no EI02

Banco de Dados	Tempo de Operação (ano)	Falhas	Frequência (ano^{-1})
LNG	$1,329 \times 10^5$	2	-
Hawskley	-	-	$1,14 \times 10^{-5}$
Purple Book	-	-	$3,80 \times 10^{-5}$
Spouge (COVO)	-	-	$3,34 \times 10^{-5}$
CCPS	-	-	$5,54 \times 10^{-5}$

A densidade da probabilidade da variabilidade populacional esperada está ilustrada na Figura 6.7.

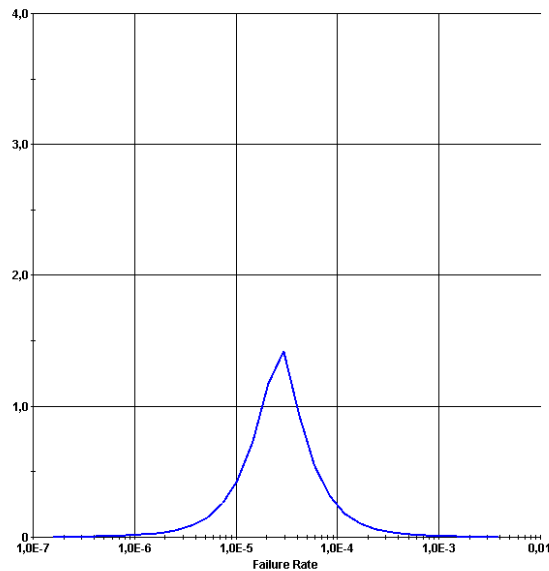


Figura 6.7: Função densidade de probabilidade da variabilidade populacional esperada das frequências do Evento Iniciador EI02

A Tabela 6.13 apresenta os valores para as curvas da média e de 5%, 50% e 95% de probabilidade para a variabilidade populacional da frequência do evento.

Tem-se, assim, que a frequência do Evento EI02, determinada pela média da distribuição esperada da variabilidade populacional, é igual a $5,85 \times 10^{-5} \text{ano}^{-1}$.

Tabela 6.13: Média e curvas percentuais da distribuição de variabilidade da frequência do EI02

Valor	Média	Curva de 5%	Curva de 50%	Curva de 95%
Média	$5,38 \times 10^{-5}$			
Variância	$4,60 \times 10^{-2}$			
1st	$1,80 \times 10^{-6}$	$2,01 \times 10^{-5}$	$5,49 \times 10^{-6}$	$6,09 \times 10^{-7}$
5th	$5,59 \times 10^{-6}$	$2,31 \times 10^{-5}$	$8,84 \times 10^{-6}$	$1,63 \times 10^{-6}$
10th	$8,93 \times 10^{-6}$	$2,54 \times 10^{-5}$	$1,14 \times 10^{-5}$	$2,70 \times 10^{-6}$
50th	$2,69 \times 10^{-5}$	$5,18 \times 10^{-5}$	$2,69 \times 10^{-5}$	$1,32 \times 10^{-5}$
90th	$7,75 \times 10^{-5}$	$2,54 \times 10^{-4}$	$6,21 \times 10^{-5}$	$2,96 \times 10^{-5}$
95th	$1,23 \times 10^{-4}$	$4,19 \times 10^{-4}$	$7,96 \times 10^{-5}$	$3,25 \times 10^{-5}$
99th	$3,78 \times 10^{-4}$	$1,15 \times 10^{-3}$	$1,28 \times 10^{-4}$	$3,77 \times 10^{-5}$

iii) Evento Iniciador 03

O Evento Iniciador 03 refere-se ao rompimento da linha de envio do Gás Natural da estação de mediação até o limite de bateria – de onde ele será enviado aos

gasodutos para envio ao consumidor final. A mediana da distribuição a priori utilizada foi de $3,94 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$. A Tabela 6.14 mostra as evidências utilizadas para o EI03.

Tabela 6.14: Dados utilizados como evidências no EI03

Banco de Dados	Tempo de Operação (ano)	Falhas	Frequência (ano^{-1})
LNG	$1,329 \times 10^5$	2	-
Hawskley	-	-	$1,50 \times 10^{-5}$
Purple Book	-	-	$5,00 \times 10^{-5}$
Spouge (COVO)	-	-	$4,40 \times 10^{-5}$
CCPS	-	-	$7,29 \times 10^{-5}$

A densidade da probabilidade da variabilidade populacional esperada pode ser vista na Figura 6.8.

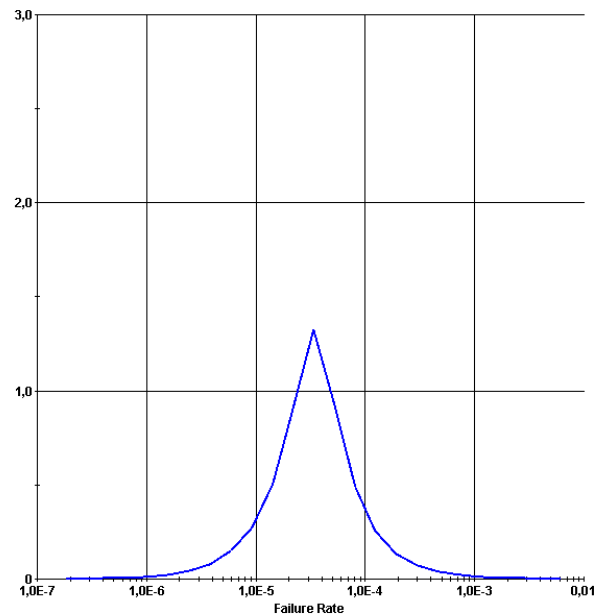


Figura 6.8: Função densidade de probabilidade da variabilidade populacional esperada das frequências do Evento Iniciador 3

A Tabela 6.15 apresenta os valores para as curvas da média e de 5%, 50% e 95% de probabilidade para a variabilidade populacional da frequência do evento.

Tem-se, assim, que a frequência do Evento EI03, determinada pela média da distribuição esperada da variabilidade populacional, é igual a $7,51 \times 10^{-5} \text{ano}^{-1}$.

Tabela 6.15: Média e curvas percentuais da distribuição de variabilidade da frequência do EI03

Valor	Média	Curva de 5%	Curva de 50%	Curva de 95%
Média	$7,51 \times 10^{-5}$			
Variância	$1,15 \times 10^{-3}$			
1st	$1,95 \times 10^{-6}$	$2,31 \times 10^{-5}$	$6,15 \times 10^{-6}$	$6,19 \times 10^{-7}$
5th	$6,32 \times 10^{-6}$	$2,75 \times 10^{-5}$	$1,03 \times 10^{-5}$	$1,74 \times 10^{-6}$
10th	$1,04 \times 10^{-5}$	$3,06 \times 10^{-5}$	$1,35 \times 10^{-5}$	$2,95 \times 10^{-6}$
50th	$3,37 \times 10^{-5}$	$6,71 \times 10^{-5}$	$3,36 \times 10^{-5}$	$1,58 \times 10^{-5}$
90th	$1,04 \times 10^{-4}$	$3,52 \times 10^{-4}$	$8,25 \times 10^{-5}$	$3,86 \times 10^{-5}$
95th	$1,67 \times 10^{-4}$	$5,95 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-4}$	$4,35 \times 10^{-5}$
99th	$5,35 \times 10^{-4}$	$1,67 \times 10^{-3}$	$1,80 \times 10^{-4}$	$5,24 \times 10^{-5}$

iv) Evento Iniciador 04

O Evento Iniciador 04 consiste da transferência do vapor de Gás Natural existente nos tanques de GNL do terminal até os compressores, de onde ele retorna ao navio ou, após ser somado ao Gás Natural proveniente da regaseificação do GNL, segue à estação de medição.

A mediana da distribuição a priori utilizada foi de $3,57 \times 10^{-5}$. A Tabela 6.16 mostra as evidências utilizadas para o EI04.

Tabela 6.16: Dados utilizados como evidências no EI04

Banco de Dados	Tempo de Operação (ano)	Falhas	Frequência (ano^{-1})
LNG	$1,329 \times 10^5$	2	-
Hawskley	-	-	$1,35 \times 10^{-5}$
Purple Book	-	-	$4,50 \times 10^{-5}$
Spouge (COVO)	-	-	$3,96 \times 10^{-5}$
CCPS	-	-	$6,56 \times 10^{-5}$

A função densidade de probabilidade da variabilidade populacional esperada pode ser vista na Figura 6.9.

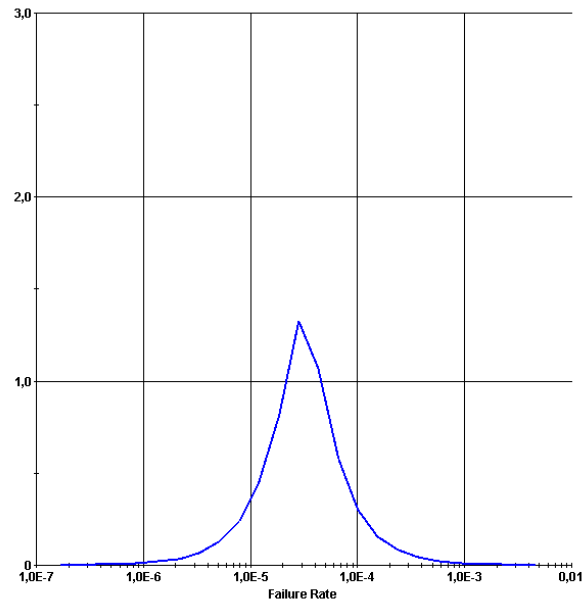


Figura 6.9: Função densidade de probabilidade da variabilidade populacional esperada das frequências do Evento Iniciador 04

A Tabela 6.17 apresenta os valores para as curvas da média e de 5%, 50% e 95% de probabilidade para a variabilidade populacional da frequência do evento.

Tem-se, assim, que a frequência do Evento EI04, determinada pela média da distribuição esperada da variabilidade populacional, é igual a $6,35 \times 10^{-5} \text{ano}^{-1}$.

Tabela 6.17: Média e curvas percentuais da distribuição de variabilidade da frequência do EI04

Valor	Média	Curva de 5%	Curva de 50%	Curva de 95%
Média	$6,35 \times 10^{-5}$			
Variância	0,0113			
1st	$1,99 \times 10^{-6}$	$2,21 \times 10^{-5}$	$5,93 \times 10^{-6}$	$6,70 \times 10^{-7}$
5th	$6,24 \times 10^{-6}$	$2,58 \times 10^{-5}$	$9,78 \times 10^{-6}$	$1,83 \times 10^{-6}$
10th	$1,00 \times 10^{-5}$	$2,85 \times 10^{-5}$	$1,27 \times 10^{-5}$	$3,04 \times 10^{-6}$
50th	$3,10 \times 10^{-5}$	$6,07 \times 10^{-5}$	$3,10 \times 10^{-5}$	$1,52 \times 10^{-5}$
90th	$9,27 \times 10^{-5}$	$3,03 \times 10^{-4}$	$7,35 \times 10^{-5}$	$3,44 \times 10^{-5}$
95th	$1,48 \times 10^{-4}$	$5,14 \times 10^{-4}$	$9,50 \times 10^{-5}$	$3,86 \times 10^{-5}$
99th	$4,59 \times 10^{-4}$	$1,42 \times 10^{-3}$	$1,56 \times 10^{-4}$	$4,55 \times 10^{-5}$

v) Evento Iniciador 05

O Evento Iniciador 05 consiste do rompimento da tubulação de Gás Natural Liquefeito, no cais, compreendida entre as válvulas de fechamento de emergência.

A mediana da distribuição a priori utilizada foi de $1,17 \times 10^{-5}$. A Tabela 6.18 mostra as evidências utilizadas para o EI05.

Tabela 6.18: Dados utilizados como evidências no EI05

Banco de Dados	Tempo de Operação (ano)	Falhas	Frequência (ano ⁻¹)
LNG	$1,329 \times 10^5$	2	-
Hawksley	-	-	$6,60 \times 10^{-5}$
Purple Book	-	-	$1,20 \times 10^{-5}$
Spouge (COVO)	-	-	$1,06 \times 10^{-5}$
CCPS	-	-	$1,75 \times 10^{-5}$

A função densidade de probabilidade da variabilidade populacional esperada podem ser vista na Figura 6.10.

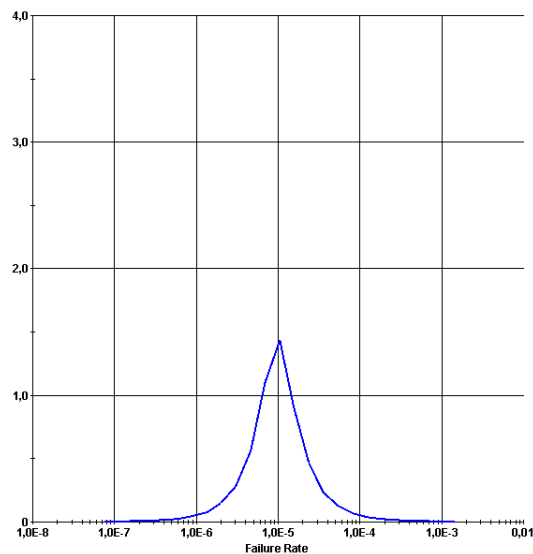


Figura 6.10: Função densidade de probabilidade da variabilidade populacional esperada das frequências do Evento Iniciador 05

A Tabela 6.19 apresenta os valores para as curvas da média e de 5%, 50% e 95% de probabilidade para a variabilidade populacional da frequência do evento.

Tem-se, assim, que a frequência do Evento EI05, determinada pela média da distribuição esperada da variabilidade populacional, é igual a $1,94 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$.

Tabela 6.19: Média e curvas percentuais da distribuição de variabilidade da frequência do EI05

Valor	Média	Curva de 5%	Curva de 50%	Curva de 95%
Média	$1,94 \times 10^{-5}$			
Variância	$7,20 \times 10^{-6}$			
1st	$7,62 \times 10^{-7}$	$7,20 \times 10^{-6}$	$2,25 \times 10^{-6}$	$2,55 \times 10^{-7}$
5th	$2,29 \times 10^{-6}$	$8,35 \times 10^{-6}$	$3,53 \times 10^{-6}$	$6,74 \times 10^{-7}$
10th	$3,56 \times 10^{-6}$	$9,27 \times 10^{-6}$	$4,47 \times 10^{-6}$	$1,11 \times 10^{-6}$
50th	$9,87 \times 10^{-6}$	$1,95 \times 10^{-5}$	$9,90 \times 10^{-6}$	$5,18 \times 10^{-6}$
90th	$2,81 \times 10^{-5}$	$9,23 \times 10^{-5}$	$2,20 \times 10^{-5}$	$1,04 \times 10^{-5}$
95th	$4,44 \times 10^{-5}$	$1,51 \times 10^{-4}$	$2,81 \times 10^{-5}$	$1,14 \times 10^{-5}$
99th	$1,45 \times 10^{-4}$	$4,47 \times 10^{-4}$	$4,48 \times 10^{-5}$	$1,31 \times 10^{-5}$

vi) Evento Iniciador 06

O Evento Iniciador 06 é referente à ruptura do tanque de Gás Natural Liquefeito no Terminal.

A Tabela 6.20 mostra as evidências utilizadas para o EI06, obtidas dos bancos de dados genéricos para tanques similares aos do GNL. A mediana da distribuição a priori utilizada foi de $4,98 \times 10^{-7}$.

Tabela 6.20: Dados utilizados como evidências no EI06

Banco de Dados	Tempo de Operação (ano)	Falhas	Frequência (ano ⁻¹)
Purple Book	-	-	$1,00 \times 10^{-8}$
CCPS	-	-	$9,85 \times 10^{-7}$

A Figura 6.11 mostra densidade da probabilidade da variabilidade populacional esperada:

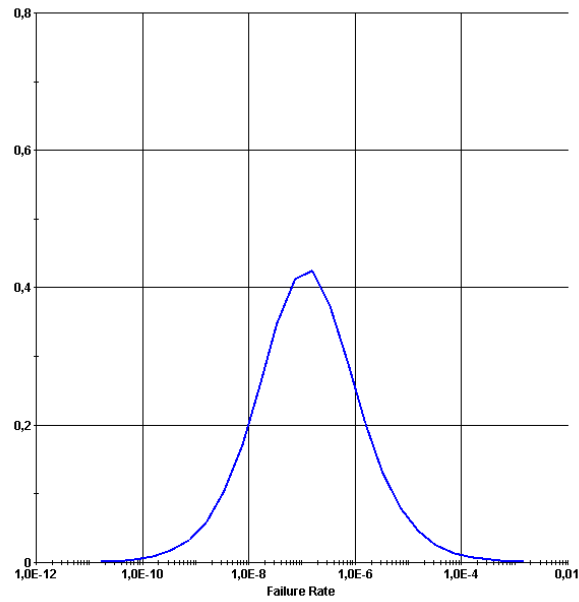


Figura 6.11: Função densidade de probabilidade da variabilidade populacional esperada das frequências do Evento Iniciador 06

A Tabela 6.21 apresenta os valores para as curvas da média e de 5%, 50% e 95% de probabilidade para a variabilidade populacional da frequência do evento. A frequência do Evento Iniciador EI06 é de $1,68 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$.

Tabela 6.21: Média e curvas percentuais da distribuição de variabilidade da frequência do EI06

Valor	Média	Curva de 5%	Curva de 50%	Curva de 95%
Média	$1,68 \times 10^{-5}$			
Variância	$2,51 \times 10^{-4}$			
1st	$4,27 \times 10^{-10}$	$1,65 \times 10^{-8}$	$1,72 \times 10^{-9}$	$7,47 \times 10^{-11}$
5th	$2,88 \times 10^{-9}$	$4,57 \times 10^{-8}$	$6,19 \times 10^{-9}$	$4,12 \times 10^{-10}$
10th	$7,21 \times 10^{-9}$	$8,45 \times 10^{-8}$	$1,21 \times 10^{-8}$	$1,00 \times 10^{-9}$
50th	$1,28 \times 10^{-7}$	$1,01 \times 10^{-6}$	$1,29 \times 10^{-7}$	$1,66 \times 10^{-8}$
90th	$2,42 \times 10^{-6}$	$1,97 \times 10^{-5}$	$1,38 \times 10^{-6}$	$1,81 \times 10^{-7}$
95th	$6,32 \times 10^{-6}$	$5,02 \times 10^{-5}$	$2,72 \times 10^{-6}$	$3,23 \times 10^{-7}$
99th	$4,78 \times 10^{-5}$	$3,02 \times 10^{-4}$	$9,61 \times 10^{-6}$	$8,79 \times 10^{-7}$

6.2.4 Árvores de Eventos

Antes de realizar o cálculo de risco individual devido a operação do terminal de GNL Offshore, é necessária a elaboração das árvores de eventos de forma a obter a

frequência de ocorrência de cada uma das consequências possíveis, conforme descrito no Capítulo 3.

As possíveis consequências no caso de liberação do GNL são o incêndio em poça e o incêndio em nuvem, enquanto que para os casos de liberação Gás Natural são jato de fogo e incêndio em nuvem. Havendo confinamento da nuvem, o vazamento poderia também gerar uma explosão. Entretanto, como no terminal offshore não existem condições de confinamento, este efeito não foi considerado nas árvores de eventos.

O incêndio em poça pode ser adiantado, caso haja ignição imediata, ou retardado, caso o fogo do incêndio em nuvem retorne à fonte. Vale notar que, no caso de a poça evaporar completamente antes da ocorrência do incêndio em nuvem, não existirá incêndio em poça retardado. Entretanto, como os volumes envolvidos nos eventos considerados no presente trabalho são significativos, considerou-se que a poça de GNL ainda estará presente quando ocorrer o incêndio em nuvem e, portanto, o incêndio em poça retardado será consequência imediata da ignição retardada, apresentando mesma probabilidade de ocorrência que o incêndio em nuvem.

De acordo com CPR18E (2005), a probabilidade de ignição imediata de um líquido é 0,065, independente de sua condição de descarga. Para um gás, entretanto, esta probabilidade é relacionada à sua vazão de descarga, no caso de uma liberação contínua, ou à massa vazada, no caso de uma liberação instantânea. A probabilidade é, ainda, diferente para o caso de um gás de alta reatividade e um de baixa reatividade, como o metano. Os eventos de liberação de Gás Natural estudados, EI03 e EI04, encaixam-se na categoria de vazão $Q > 100 \text{ kg/s}$ e $10 < Q < 100 \text{ kg/s}$, respectivamente, apresentando portanto probabilidade de ignição imediata igual a 0,04 (EI03) e 0,09 (EI04). As tabelas referentes a estas probabilidades podem ser vistas no Capítulo 3.

A probabilidade de ignição retardada depende da quantidade de fontes de ignição presentes. Como o terminal é offshore, considerou-se que existem muito poucas fontes de ignição na área ocupada pela nuvem, sendo a probabilidade de ignição retardada igual a 0,2 (COX; LEES; ANG, 1990) (Tabela 3.5).

As árvores de eventos de cada Evento Iniciador, com as respectivas probabilidades de ignição e frequências finais das possíveis consequências, encontram-se nas Figuras 6.12 a 6.17.

Por ter alcances desprezíveis em relação aos incêndios em nuvem e em poça, o jato de fogo não foi modelado no cálculo das consequências. As suas frequências estão calculadas nas árvores de eventos, mas ele não foi considerado no cálculo dos riscos.

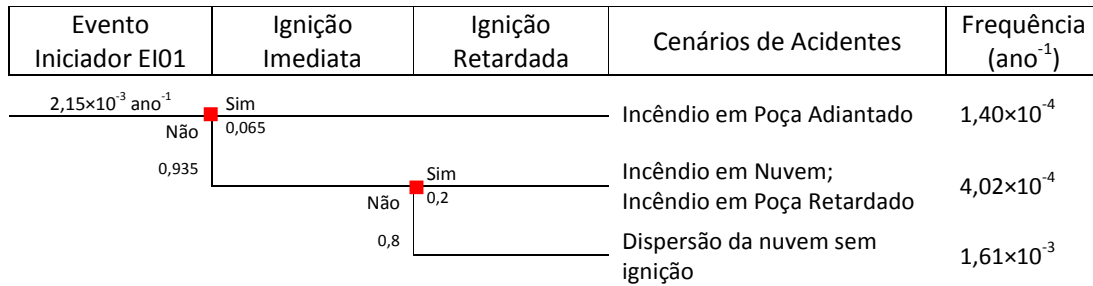


Figura 6.12: Árvore de Eventos do Evento Iniciador EI01

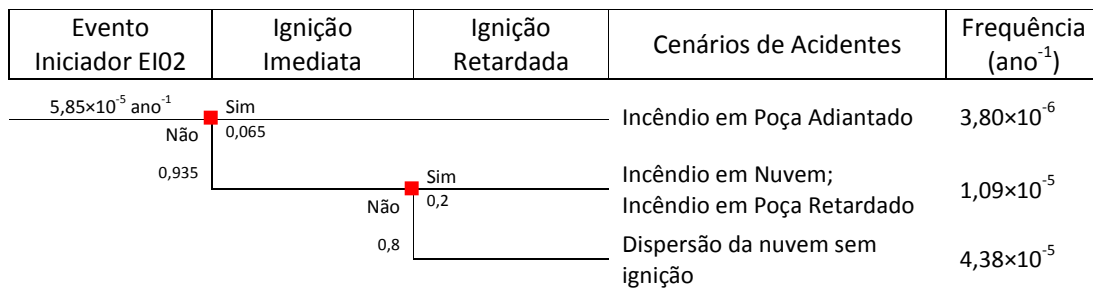


Figura 6.13: Árvore de Eventos do Evento Iniciador EI02

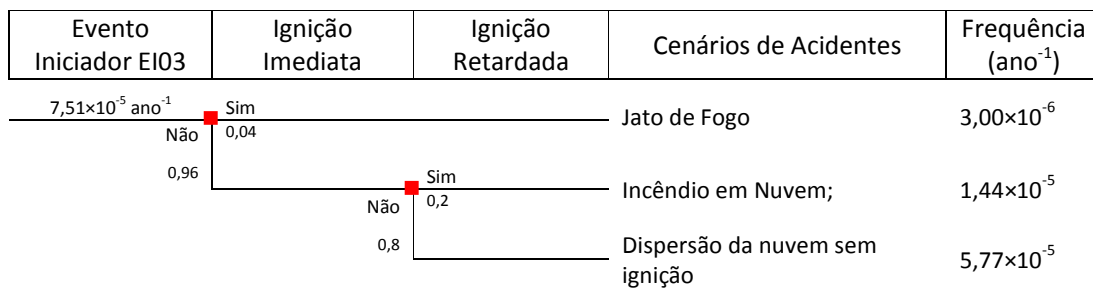


Figura 6.14: Árvore de Eventos do Evento Iniciador EI03

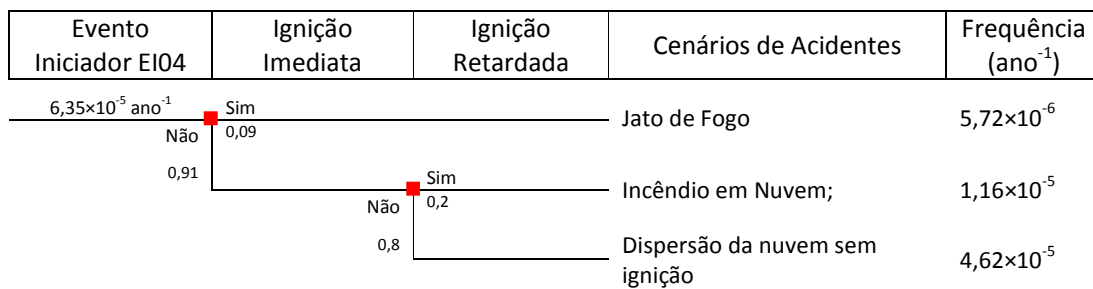


Figura 6.15: Árvore de Eventos do Evento Iniciador EI04

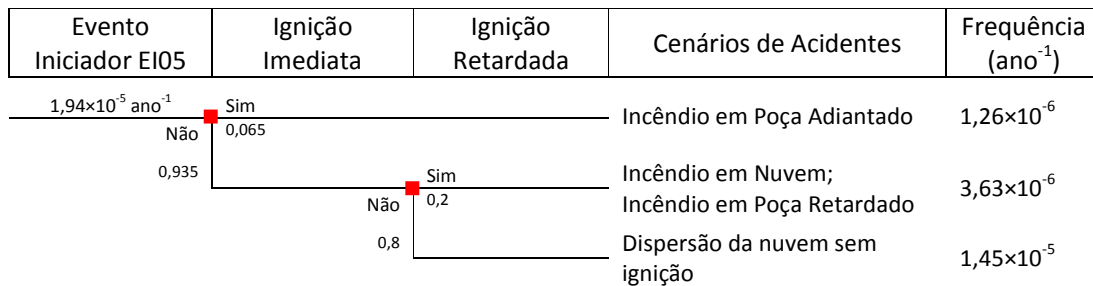


Figura 6.16: Árvore de Eventos do Evento Iniciador EI05

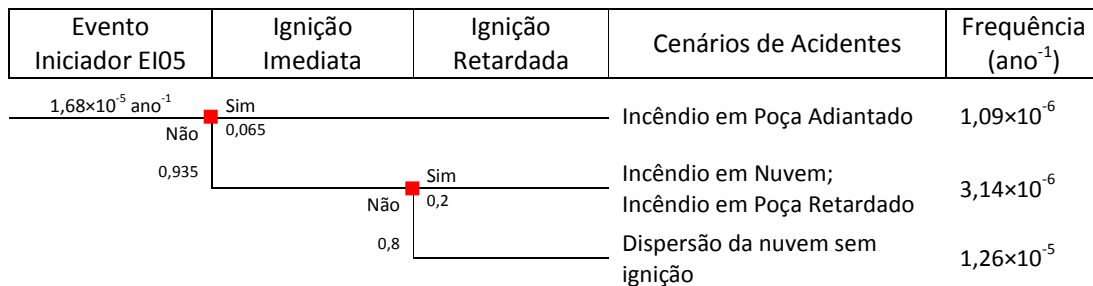


Figura 6.17: Árvore de Eventos do Evento Iniciador EI06

6.3 Cálculo dos Riscos Individuais

Seguindo a metodologia proposta no Capítulo 5, com os valores das consequências dos eventos e de suas frequências de ocorrência é possível calcular o risco gerado pelo terminal offshore de GNL no Porto de Suape. Neste trabalho o foco será o risco individual – frequência esperada com que um indivíduo localizado em determinado ponto da instalação venha a sofrer danos por causa de um evento indesejado (Purple Book CPR18E,2005).

Os riscos foram calculados com o programa RiskCurves v7.6.8, software desenvolvido pela TNO para o cálculo de riscos de acidentes, cujas referências adotadas são o YellowBook CPR14E e PurpleBook CPR18E.

A Figura 6.18 mostra as curvas de iso-risco geradas pelos acidentes no terminal. É possível observar que o risco chega a 10^{-4} ano^{-1} , maior que o limite máximo tolerável de acordo com a norma CETESB P4.261, conforme mostrado no Capítulo 3. Entretanto, esta curva é limitada à área do terminal e vizinhança offshore, não atingindo a costa e o terminal de Suape.

O evento responsável para que o risco atinja esse valor é o EI01, correspondente à ruptura do braço de descarregamento de GNL do navio supridor ao terminal, como pode ser visto na Figura 6.19, que mostra a frequência de fatalidades anual pela

distância do terminal, e na Figura 6.20, que mostra as curvas de iso-risco geradas pelos eventos no Terminal excluindo-se o evento EI01. Nesta Figura, percebe-se que, sem este evento, o risco não excede o limite estabelecido pela CETESB.

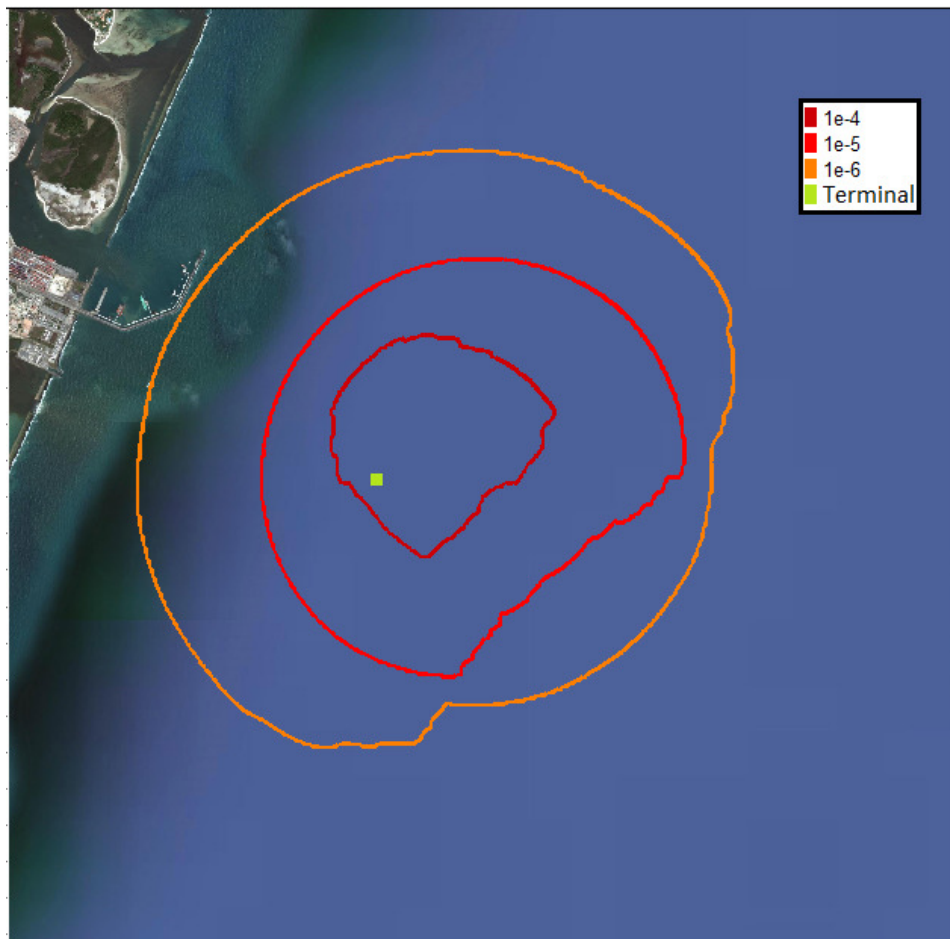


Figura 6.18: Curvas de iso-risco geradas pelos eventos do Terminal. As curvas representam a frequência de fatalidade em base anual (valores correspondentes na legenda)

O evento EI01 não atinge os maiores alcances de vulnerabilidade, mas possui frequência de ocorrência superior às dos outros eventos, o que eleva seu risco individual final. Entretanto, como pode ser visto na Tabela 6.11, foram utilizadas opiniões de apenas dois especialistas para esse evento, havendo considerável nível de incerteza na estimação da frequência de ocorrência do evento iniciador, conforme ilustrado na Figura 6.6. Além disso, o braço de descarregamento de GNL do navio para o terminal tem características bastante específicas, enquanto que os dados utilizados são genéricos. Com o uso de um dado específico da indústria de GNL para a

verossimilhança durante a segunda etapa da análise Bayesiana, essa frequência ficará mais real e o risco gerado pode não ultrapassar o limite estabelecido pela CETESB.

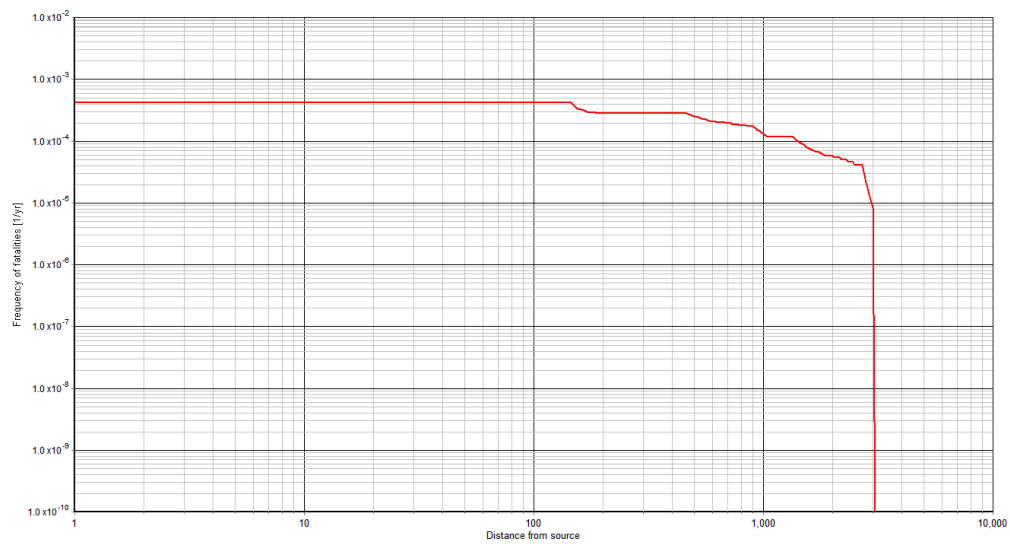


Figura 6.19: Risco gerado pelo evento EI01 atinge valores maiores que 10^{-5} ano^{-1} , limite máximo tolerável estabelecido pela CETESB

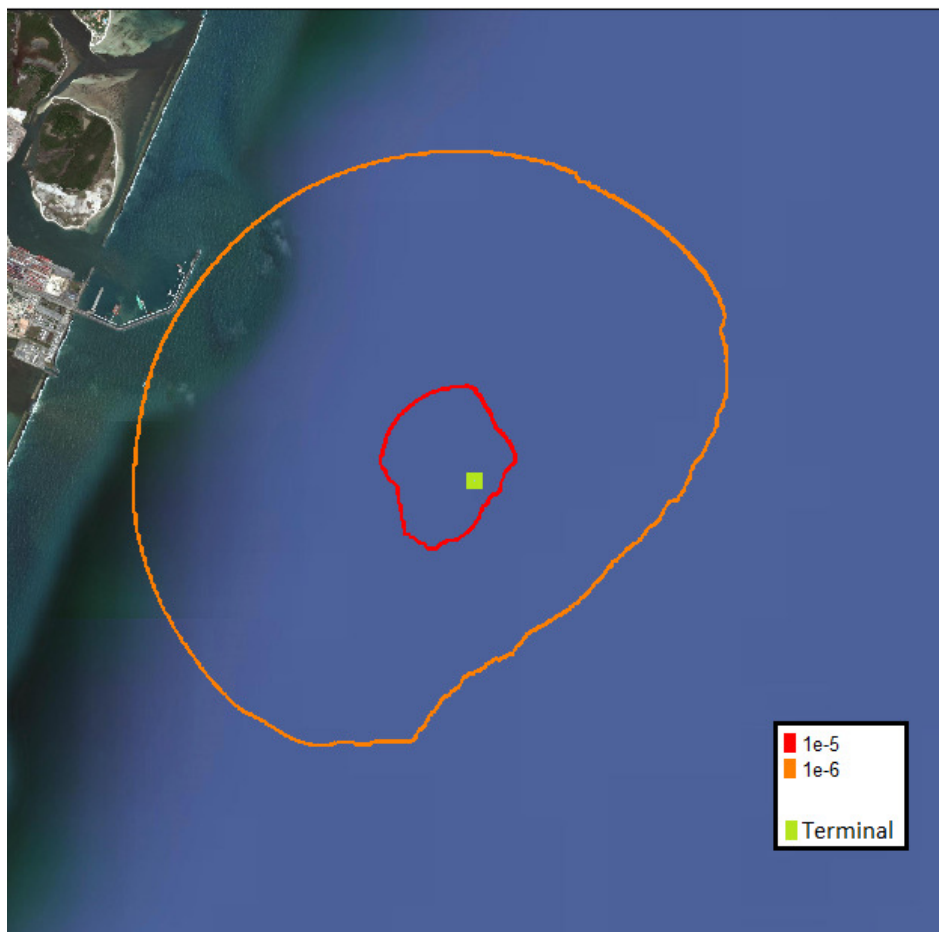


Figura 6.20: Curvas de iso-risco geradas pelos eventos do Terminal, excluindo-se o evento EI01. As curvas representam a frequência de fatalidade em base anual (valores correspondentes na legenda)

O Evento EI06, correspondente à ruptura do tanque de GNL, apesar de atingir um alcance de vulnerabilidade superior a 6km no caso de um incêndio em nuvem, gerou risco dentro do limite do tolerável, como pode ser visto na Figura 6.20.

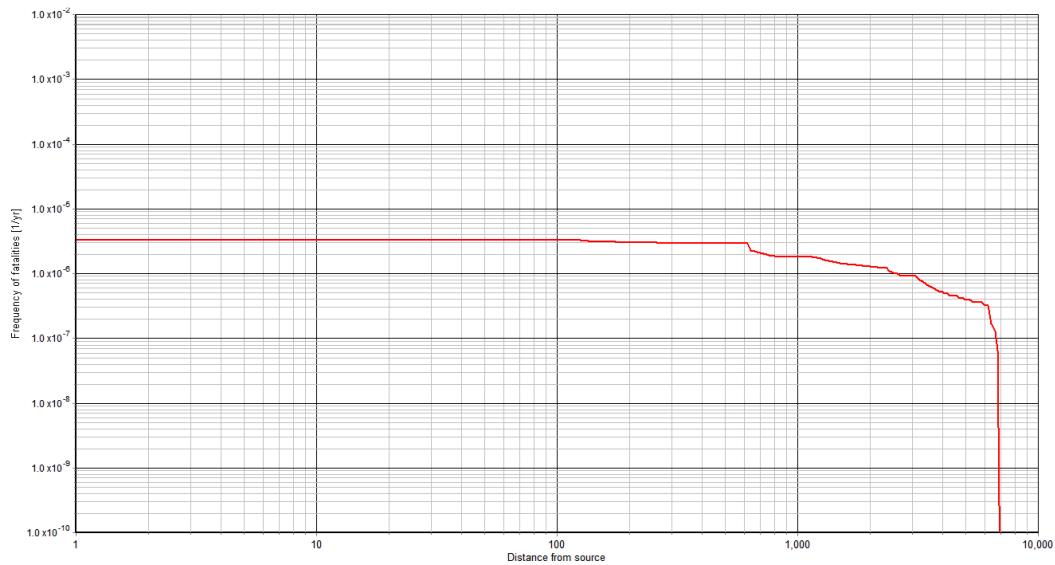


Figura 6.21: Risco gerado pelo evento EI06

Estas observações ilustram o quanto uma análise preliminar baseada apenas no cálculo das consequências de um acidente pode não representar bem o risco gerado por este. A análise de frequências é uma etapa fundamental da Análise Quantitativa de Risco e é essencial que as frequências sejam bem calculadas. Assim, especialmente em indústrias que possuem dados esparsos de falhas de equipamentos, como a do Gás Natural Liquefeito, a Análise Bayesiana em Dois Estágios deve ser considerada para cálculo final das frequências, afim de que o risco calculado seja o mais realista possível.

A partir dos resultados dos riscos individuais é possível afirmar que um terminal offshore no Porto de Suape com as configurações adotadas neste trabalho não colocaria em risco as comunidades e os trabalhadores do Porto em caso de um acidente com vazamento do produto. É importante ressaltar que a distância entre o terminal e costa foi estabelecida de acordo com os resultados da análise de consequências. É possível estabelecer nova distância a partir dos resultados do cálculo do risco.

Capítulo 7: Conclusões e Trabalho Futuros

Apesar de a indústria de Gás Natural Liquefeito não apresentar uma grande quantidade de acidentes envolvendo fatalidades em sua história, é necessário que seus riscos sejam considerados, visto o perigo em que colocam suas instalações em caso de vazamento de GNL.

Uma análise dos riscos gerados pelas plantas de GNL deve ser especialmente aplicada aos terminais de armazenamento e regaseificação, devido ao crescimento rápido da quantidade dessas instalações no mundo - especialmente os terminais offshore -, inclusive no Brasil.

Enquanto diversos estudos tratam das consequências de um vazamento de GNL, com revisão de resultados experimentais e validação de modelos, a metodologia a ser empregada na análise de frequências de um acidente em um terminal não é consolidada. Devido ao pouco tempo de existência da indústria de GNL, os dados de falhas específicos dessa indústria não são estatisticamente confiáveis. O uso de dados de indústrias similares também não levaria a um resultado correto, por causa das diferenças que existem entre as condições de operação entre as indústrias.

O uso da análise Bayesiana supera essas dificuldades, pois permite a utilização de dados específicos e genéricos, assim como dados empíricos e opiniões de especialistas. O teorema de Bayes, entretanto, não pode ser utilizado de forma direta, utilizando-se os dados específicos da planta como evidências para atualização de um conhecimento inicial, formado pelos dados genéricos, pois os dados são obtidos em diferentes condições de operação, o que torna a população não-homogênea em relação à taxa de falha. O cálculo das frequências de acidentes em terminais, desse modo, subestima a incerteza em relação aos dados, levando a uma distribuição a posteriori dos valores das frequências mais estreita do que realmente é.

Assim, a Análise Bayesiana em Dois Estágios é uma forma correta e adequada para calcular frequências de acidentes em um terminal de GNL, por considerar a não-homogeneidade dos dados.

Através do uso da Análise Bayesiana em Dois Estágios, do conhecimento das consequências de um acidente com vazamento de GNL em um terminal offshore e

revisão das etapas de uma AQR, foi possível desenvolver uma Metodologia Bayesiana de Análise Quantitativa de Risco para Terminais Offshore de GNL.

A aplicação desta metodologia a um hipotético terminal offshore no Porto de Suape permitiu calcular os riscos aos quais estariam suscetíveis as pessoas no Porto em caso de acidente no terminal.

O cálculo de consequências mostrou que, no caso de ruptura de um tanque de GNL o alcance de vulnerabilidade pode chegar a uma distância do terminal pouco maior de 6km. Este evento, entretanto, por causa da baixa frequência de ocorrência, não é o maior contribuidor para os resultados do risco individual. O evento de ruptura do braço de descarregamento de GNL do navio para o terminal, por outro lado, é responsável pelo risco individual atingir o valor de 10^{-4} ano^{-1} , que ultrapassa o limite estabelecido por norma CETESB P4.261 (2003). Entretanto, a distribuição a posteriori dos valores de frequência mostra que existe um considerável nível de incerteza, pela pouca quantidade de evidências disponíveis.

Além disso, por ser um terminal hipotético, não existem dados específicos da planta para realização do segundo estágio da Análise Bayesiana em Dois Estágios. Esta situação é típica de AQR de plantas em fase de concepção onde não há experiência operacional.

Foi aplicado, portanto, apenas o primeiro estágio no cálculo das frequências de acidentes em um terminal no Porto de Suape, com cálculo da distribuição de probabilidade dos parâmetros da variabilidade populacional e obtenção da distribuição da variabilidade populacional esperada. O valor da frequência utilizado no cálculo dos riscos, assim, é baseado apenas em dados genéricos.

Obtendo-se dados específicos do terminal, no caso de sua implantação, será possível, em trabalhos futuros, utilizar a distribuição a posteriori do primeiro estágio, calculada nesse trabalho, como a distribuição a priori no segundo estágio, para ser atualizada com os dados específicos.

É interessante, inclusive, que em trabalhos futuros seja utilizada a distribuição inteira da posteriori da primeira etapa como priori da segunda, o que é importante para propagação da incerteza, utilizando, por exemplo, técnicas de Monte Carlo.

Referências Bibliográficas

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. *Atlas da Energia Elétrica no Brasil*, 2008

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. *Boletim Mensal do Gás Natural*, n. 18, 2010

American Institute of Chemical Engineers – AIChE. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. 2 ed. New York, 2000.

BAIK, J.; RAGHUNATHAN, V.; WITLOX, H. Consequence Modeling of LNG Marine Incidents. In: 7TH PROFESSIONAL DEVELOPMENT CONFERENCE & EXHIBITION. Kingdom of Bahrain, 2005

BERNATIK, A; SENOVSKY, P.; PITT, M. LNG as a Potential Alternative Fuel : Safety and Security of Storage Facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 24, p.19-24. 2010

BLACKELL, B. Delivering a New FSRU. LNGindustry.com, 2009

BLAKWELL, B.; SKAAR, H. Delivering The World' First FSRUs. In: 24th WORLD GAS CONFERENCE. Buenos Aires, 2009

BP. Statistical Review of World Energy, 2010

BUBBICO, R.; CAVE,S.; MAZZAROTTA,B. Preliminary Risk Analysis for LNG Tankers Approaching a Maritime Terminal. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, p 1–5, 2009

CAMACHO, E. Uma Proposta de Metodologia para Análise Quantitativa de Riscos Ambientais. 140 folhas. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

CCPS. Guidelines for Process Equipment Reliability Data, 1989

CEE - Center for Energy Economics. An Overview on Liquefied Natural Gas (LNG), its Properties, Organization of the LNG Industry and Safety Considerations. Austin, 2007

CEE - Center for Energy Economics. Offshore LNG Receiving Terminals. Austin, 2006

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Manual de Orientação para Elaboração de Estudos de Análise de Riscos, P4.261. 2003

CORMIER, B.; QI,R.; YUN, G.; ZHANG, Y.; MANNAM, S.. Application of Computational Fluid Dynamics for LNG Vapor Dispersion Modeling: a Study of Key Parameters. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 22, p. 332–352, 2008

COVO. Rijnmond Public Authority, A Risk Analysis of Six Potentially Hazardous Industrial Objects in the Rijnmond Area- A Pilot Study, COVO, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, 1982

COX, A.; LEES, F.; ANG, M. Classification of Hazardous Locations. 1ed. Ed IChemE. 1990

DROGUETT, E.; MOSLEH, F. Bayesian Assessment of the Variability of Reliability Measures. *Pesquisa Operacional*, v 26, p109-127. 2006

DROGUETT, E.; GROEN, F.; MOSLEH, A. The Combined Use of Data and Experts Estimates in Population Variability Analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, v83, p311-321. 2003

GREGORY, P.; Bayesian Logical Data Analysis for the Physical Sciences: A Comparative Approach with MathematicaTM Support. Ed. Cambridge University Press. 2005

HAVENS, J., SPICER, T., United States Regulations for Siting LNG Terminals: Problems and potential. *Journal of Hazardous Materials*, p 439-443. 2007

HAWKSLEY, J. Some Social, Technical and Economic Aspects of the Risks of Large Plants, CHEMRAWN III, 1984

IEA - International Energy Agency. Key World Energy Statistics, 2008. Disponível em <www.iea.org>

IoMosaic Corporation. LNG Properties and Hazards – Understand LNG Rapid Phase Transitions (RPT). 2006

JOHNSON, D. & CORNWELL, J. Modeling the Release, Spreading and Burning of LNG, LPG and Gasoline on Water. *Journal of Hazardous Materials*, v. 140, p 535–540, 2006

JOHNSON, D.; WELKER, J., Development of an Improved LNG Plant Failure Rate Data Base, Applied Technology Corp., Norman, OK, 1981.

KAPLAN, S. On a 'two-stage' Bayesian procedure for determining failure rates from experimental data. *IEEE Trans Power Appar Syst*, p 195–199, 1983

KELKAR, M. Natural Gas Production Engineering. Penwell Corporation. Tulsa, 2008

KELLY, D.; SMITH, C. Bayesian Inference for Probabilistic Risk Assessment : A Practitioner's Guidebook. Ed Springer. London, 2011

KOO, J.; KIM, K.; SO, W.; KIM, K.; YOON, E. Safety Assessment of LNG Terminal Focused on the Consequence Analyses of LNG Spills. In: PROCEEDING OF THE 1ST ANNUAL GAS PROCESSING SYMPOSIUM, 2009

LIAO, P. Utilização da Energia “Fria” de Regaseificação do Gás Natural Liquefeito em Outras Aplicações. 106 folhas. Monografia – Universidade de São Paulo. 2007

LUKETA-HANLIN, A. A Review of Large-Scale LNG Spills: Experiments and Modelling. *Journal of Hazardous Materials* A132 , p 119–140, 2005

MEYER, W.; HENNINGS, W. Prior distributions in two-stage Bayesian estimation of failure rates. In: Kafka P, Schuller GI, editors. *Proceedings of the ESREL'99, 10th European Conference*, v 2, p 893–898. The Netherlands, 1999

Ministério de Minas e Energia – Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Plano Nacional de Energia 2030, 2007

MOSLEH A. Bayesian modeling of expert-to-expert variability and dependence in estimating rare event frequencies. *Reliab Engng Syst Safety*, p 1–3.1992

PETROBRÁS. N-2782 *Técnicas Aplicáveis à Análise de Riscos Industriais*. 2008

PETROBRAS/FADE. Estudos de Impactos Ambientais da RNEST (EIA). Recife: FADURPE,. v. 1, 1770 p. 2006

PITBLADO, R. Consequences of LNG Marine Incidents. In: CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY CONFERENCE. Orlando, 2004

PORN, K. The two-stage Bayesian method used for the T-book application. *Reliab Engng Syst Safety*, v 2, p 169–179, 1996

RAJ, P. LNG Fires: A Review of Experimental Results, Models and Hazards Prediction Challenges. *Journal of Hazardous Materials*, v 140, p 444–464, 2006

REN, Terminal de GNL. – website. Disponível em <
http://www.ren.pt/vPT/Gas/TerminaldeSines/Pages/gas-natural_terminal-sines.aspx>

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

SHAFAGHI, A., Equipment Failure Rate Updating Bayesian Estimation, the Mary Kay O'Connor Process Safety Center Symposium, p 260-268. 2006.

SIU, N.; KELLY, D. Bayesian Parameter Estimation in Probabilistic Risk Assessment. *Reliability Engineering & System Safety*, v 62, p 89-116, 1998

SPITZENBERGER, C. Risk Comparison of Offshore vs. Onshore LNG Receiving Terminals. In: 6th TOPICAL CONFERENCE ON NATURAL GAS UTILIZATION. Orlando, 2006

The California Energy Commission. Liquefied Natural gas Safety – website. Disponível em <
<http://www.energy.ca.gov/lng/safety.html>>

The Netherlands Organization of Applied Scientific Research – TNO. Guidelines for Quantitative Risk Assessment – Methods for the Calculation of Physical Effects “Yellow Book” CPR14E. 3ed. The Hague, 2005.

The Netherlands Organization of Applied Scientific Research – TNO. CPR18E Guidelines for Quantitative Risk Assessment – Guideline for Quantitative Risk Assessment “Purple Book” CPR18E. 3ed. The Hague, 2005.

VALLDERDÚ, J. The False Dilemma: Bayesian vs Frequentist. Eletronic Journal for Philosophy. Catalonia, 2008

VANEM, E.; ANTÃO, P.; OSTVIK, I.; COMAS, F. Analysing the Risk of LNG Carrier Operations. *Reliability Engineering and System Safety*, v 93, p 1328–1344, 2007

VOSE, D. Risk Analysis: A Quantitative Guide. 3ed. Ed John Wiley & Sons. 2008

WIJNGAARDEN, W.; OOMEN, H.; HOORN, J. Offshore LNG Terminals: Sunk or Floated? In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. Houston, 2004

WOODWARD, J.; PITBLADO, R. LNG Risk Based Safety – Modeling and Consequence Analysis. 1 ed. Ed Wiley. New Jersey, 2010

YAN, Z.; HAIMES, Y. Cross-Classified Hierarchical Bayesian Models for Risk-Based Analysis of Complex Systems Under Sparse Data. *Reliability Engineering and Safety System*, v 95, p 764-776. 2010

YANG, C.; HUANG, Z. Lower Emission LNG Vaporization. LNG Journal November/December, p 24-26, 2004

YUN, G. Bayesian-LOPA Methodology for Risk Assessment of an LNG Importation Terminal. 288 folhas. Dissertação. Texas A&M University. 2007

YUN, G.; ROGERS, W.; MANNAN, M. Risk Assessment of LNG Importation Terminals Using the Bayesian-LOPA Methodology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v 22, p91-96. 2009

APÊNDICE 6.1

Segue abaixo a Análise Preliminar de Perigo para o terminal offshore de GNL de acordo com o fluxograma de processo da Figura 6.1

Tabela A1: Análise Preliminar de Perigo

Cenário	Perigo	Trecho	Causas	Efeitos	cat severidade
1	Pequena liberação de Gás Natural Liquefeito	Braço de descarregamento de GNL	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Incêndio em Poça, Incêndio em nuvem	III
2	Grande liberação de Gás Natural Liquefeito	Braço de descarregamento de GNL	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas, ou desconexão do braço por condições climáticas extremas	Incêndio em Poça, Incêndio em nuvem	IV
3	Pequena liberação de Gás Natural Liquefeito	Transferência de GNL do cais até a costa	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Incêndio em Poça, Incêndio em nuvem	III
4	Grande liberação de Gás Natural Liquefeito	Transferência de GNL do cais até a costa	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	incêndio em poça, incêndio em nuvem	IV
5	Pequena liberação de Gás Natural Liquefeito	Transferência de líquido da costa até os tanques de GNL	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Incêndio em Poça, Incêndio em nuvem	III
6	Grande liberação de Gás Natural Liquefeito	Transferência de líquido da costa até os tanques de GNL	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	incêndio em poça, incêndio em nuvem	IV
7	Pequena liberação de Gás Natural Liquefeito	Transferência de GNL dos tanques para a bomba de alta pressão	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Incêndio em Poça, Incêndio em nuvem	II
8	Grande liberação de Gás Natural Liquefeito	Transferência de GNL dos tanques para a bomba de alta pressão	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	Incêndio em Poça, Incêndio em nuvem	III

Cenário	Perigo	Trecho	Causas	Efeitos	cat severidade
9	Pequena liberação de Gás Natural Liquefeito	Transferência de GNL da descarga da bomba de alta pressão aos vaporizadores	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Incêndio em Poça, Incêndio em nuvem	II
10	Grande liberação de Gás Natural Liquefeito	Transferência de GNL da descarga da bomba de alta pressão aos vaporizadores	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	Incêndio em Poça, Incêndio em nuvem	III
11	Pequena liberação de Gás Natural Liquefeito	Recondensador	Fissura no equipamento devido a falhas mecânicas das juntas ou soldas ou corrosão do material	Incêndio em Poça, Incêndio em nuvem	II
12	Grande liberação de Gás Natural Liquefeito	Recondensador	Ruptura no equipamento devido a falhas mecânicas das juntas ou soldas ou corrosão do material	Incêndio em Poça, Incêndio em nuvem	III
13	Pequena liberação de Gás Natural	Transferência de GN da saída dos vaporizadores até a estação de medição de gás	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Jato de fogo, incêndio em nuvem	II
14	Grande liberação de Gás Natural	Transferência de GN da saída dos vaporizadores até a estação de medição de gás	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	incêndio em nuvem	III
15	Pequena liberação de Gás Natural	GN da estação de medição de gás até o limite de bateria	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Jato de fogo, incêndio em nuvem	II
16	Grande liberação de Gás Natural	GN da estação de medição de gás até o limite de bateria	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	incêndio em nuvem	III

Cenário	Perigo	Trecho	Causas	Efeitos	cat severidade
17	Pequena liberação de Gás Natural	Transferência de vapor dos tanques de GNL até os compressores	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Jato de fogo, incêndio em nuvem	II
18	Grande liberação de Gás Natural	Transferência de vapor dos tanques de GNL até os compressores	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	incêndio em nuvem	III
19	Pequena liberação de Gás Natural	Transferência de GN do compressor ao recondensador	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Jato de fogo, incêndio em nuvem	I
20	Grande liberação de Gás Natural	Transferência de GN do compressor ao recondensador	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	incêndio em nuvem	II
21	Pequena liberação de Gás Natural	Reciclo de gás do compressor ao vaso de separação de líquidos	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Jato de fogo, incêndio em nuvem	II
22	Grande liberação de Gás Natural	Reciclo de gás do compressor ao vaso de separação de líquidos	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	incêndio em nuvem	III
23	Pequena liberação de Gás Natural	Reciclo de gás do vaso de separação ao brsaço de retorno de vapor para o navio	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Jato de fogo, incêndio em nuvem	II
24	Grande liberação de Gás Natural	Reciclo de gás do vaso de separação ao varço de retorno de vapor para o navio	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	incêndio em nuvem	III

Cenário	Perigo	Trecho	Causas	Efeitos	cat severidade
25	Pequena liberação de Gás Natural	Compressor 1	Fissura no equipamento devido a falhas mecânicas das juntas ou soldas ou corrosão do material	Jato de fogo, incêndio em nuvem	I
26	Grande liberação de Gás Natural	Compressor 1	Ruptura no equipamento devido a falhas mecânicas das juntas ou soldas ou corrosão do material	incêndio em nuvem	II
27	Pequena liberação de Gás Natural	Compressor 2	Fissura no equipamento devido a falhas mecânicas das juntas ou soldas ou corrosão do material	Jato de fogo, incêndio em nuvem	I
38	Grande liberação de Gás Natural	Compressor 2	Ruptura no equipamento devido a falhas mecânicas das juntas ou soldas ou corrosão do material	incêndio em nuvem	II
29	Pequena liberação de Gás Natural	Transferência de GN do compressor 2 até a saída do vaporizador	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Jato de fogo, incêndio em nuvem	I
30	Grande liberação de Gás Natural	Transferência de GN do compressor 2 até a saída do vaporizador	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	incêndio em nuvem	II
31	Pequena liberação de Gás Natural Liquefeito	Sucção e descarga da bomba de alta pressão	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Incêndio em Poça, Incêndio em nuvem	III
32	Grande liberação de Gás Natural Liquefeito	Sucção e descarga da bomba de alta pressão	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	Incêndio em Poça, Incêndio em nuvem	IV
33	Pequena liberação de Gás Natural Liquefeito	Descarga da bomba de baixa pressão	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Incêndio em Poça, Incêndio em nuvem	III
34	Grande liberação de Gás Natural Liquefeito	Descarga da bomba de baixa pressão	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	Incêndio em Poça, Incêndio em nuvem	IV

Cenário	Perigo	Trecho	Causas	Efeitos	cat severidade
35	Pequena liberação de Gás Natural	Entrada e saída do ORV	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Jato de fogo, incêndio em nuvem	II
36	Grande liberação de Gás Natural	Entrada e saída do ORV	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	incêndio em nuvem	III
37	Pequena liberação de Gás Natural	Entrada e saída do SCV	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Jato de fogo, incêndio em nuvem	I
38	Grande liberação de Gás Natural	Entrada e saída do SCV	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	incêndio em nuvem	II
39	Pequena liberação de Gás Natural Liquefeito	Tubulação no cais entre as válvulas ESD	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	incêndio em poça, incêndio em nuvem	III
40	Grande liberação de Gás Natural Liquefeito	Tubulação no cais entre as válvulas ESD	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	incêndio em poça, incêndio em nuvem	IV
41	Pequena liberação de Gás Natural	Braço de vapor de GN	Fissura na tubulação devido a falha mecânica de válvulas, falha nas juntas ou soldas, falha em acessórios ou corrosão do material	Jato de fogo, incêndio em nuvem	II
42	Grande liberação de Gás Natural	Braço de vapor de GN	Ruptura total da tubulação por falha mecânica, falha nas soldas e juntas	incêndio em nuvem	III
43	Pequena liberação de Gás Natural Liquefeito	Tanques de GNL	Fissura no tanque de GNL	incêndio em poça, incêndio em nuvem	III
44	Grande liberação de Gás Natural Liquefeito	Tanques de GNL	Ruptura do tanque de GNL	incêndio em poça, incêndio em nuvem	IV

APÊNDICE 6.2

Seguem abaixo, para os Eventos Iniciadores EI02 a EI06, as distribuições conjuntas dos parâmetros da variabilidade populacional e sua distribuição acumulada esperada.

a) Evento Iniciador 02

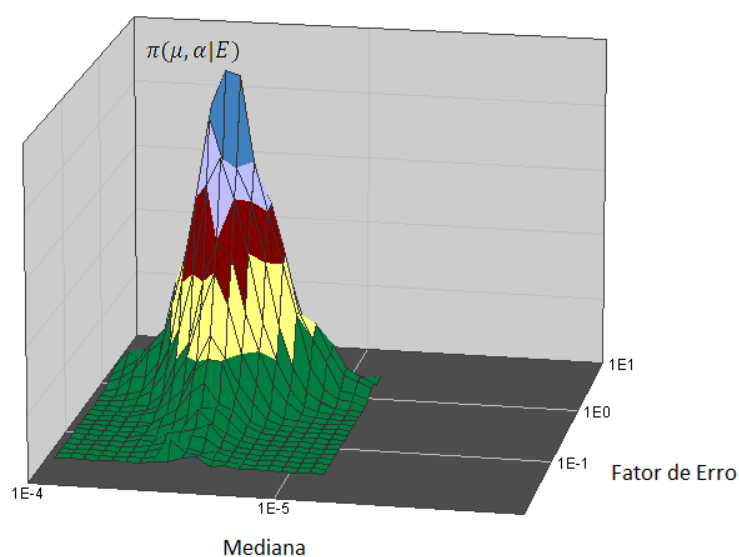


Figura A1: Distribuição a posteriori dos parâmetros da variabilidade populacional - EI02

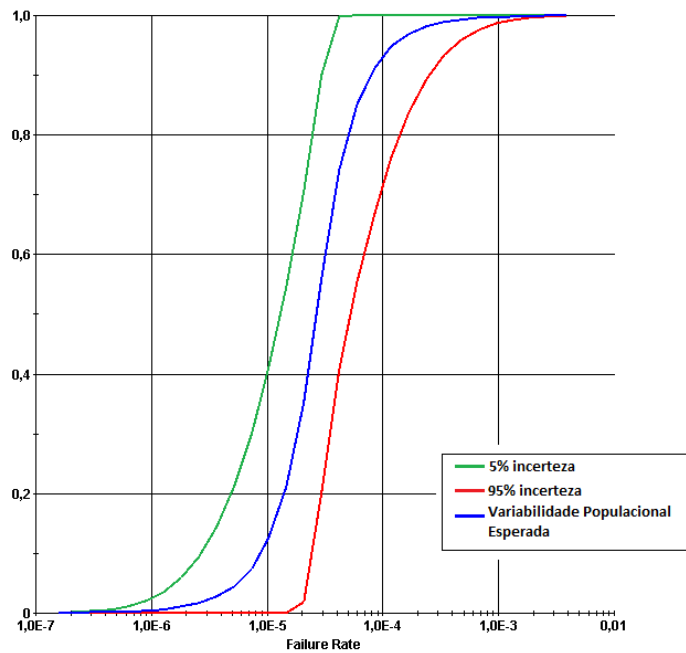


Figura A2: Distribuição acumulada esperada da variabilidade populacional da frequência do Evento Iniciador EI02

b) Evento Iniciador 03

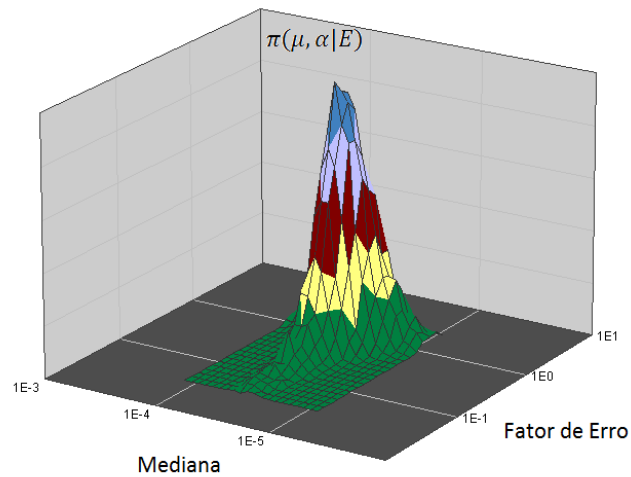


Figura A3: Distribuição a posteriori dos parâmetros da variabilidade populacional - EI03

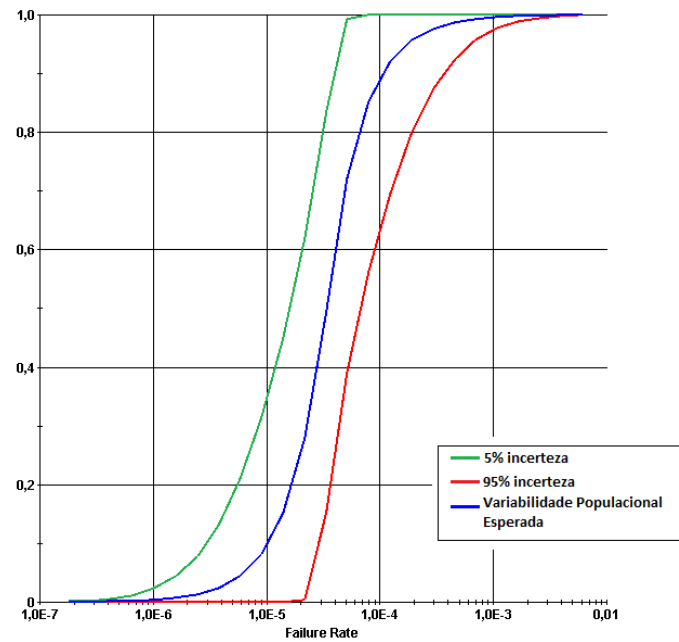


Figura A4: Distribuição acumulada esperada da variabilidade populacional da frequência do Evento Iniciador EI03

c) Evento Iniciador 04

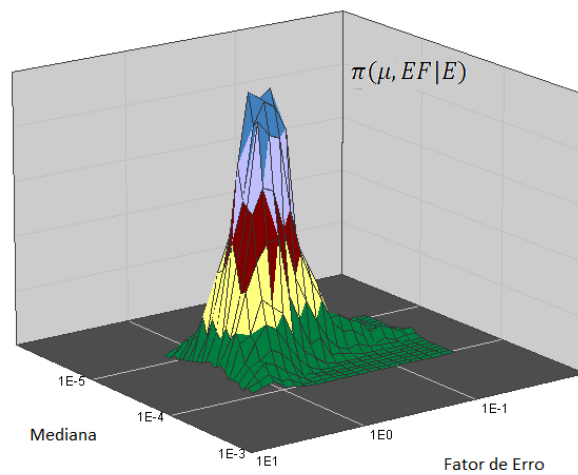


Figura A5: Distribuição a posteriori dos parâmetros da variabilidade populacional - EI04

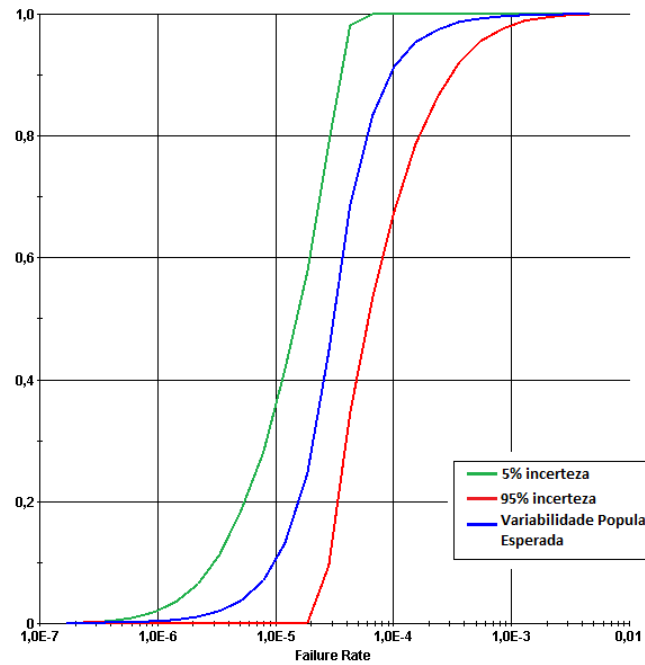


Figura A6: Distribuição acumulada esperada da variabilidade populacional da frequência do Evento Iniciador 04

d) Evento Iniciador 05

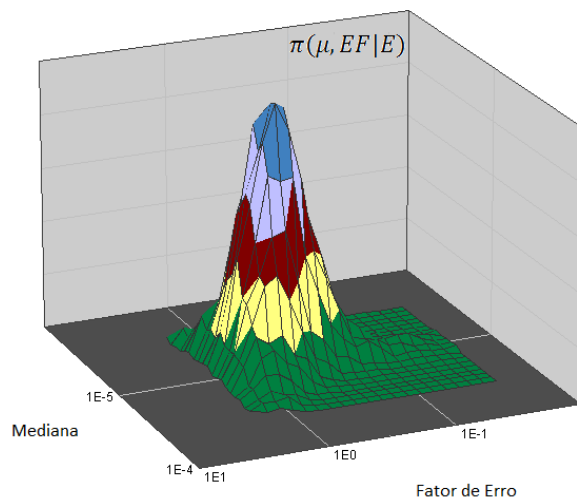


Figura A7: Distribuição a posteriori dos parâmetros da variabilidade populacional - EI05

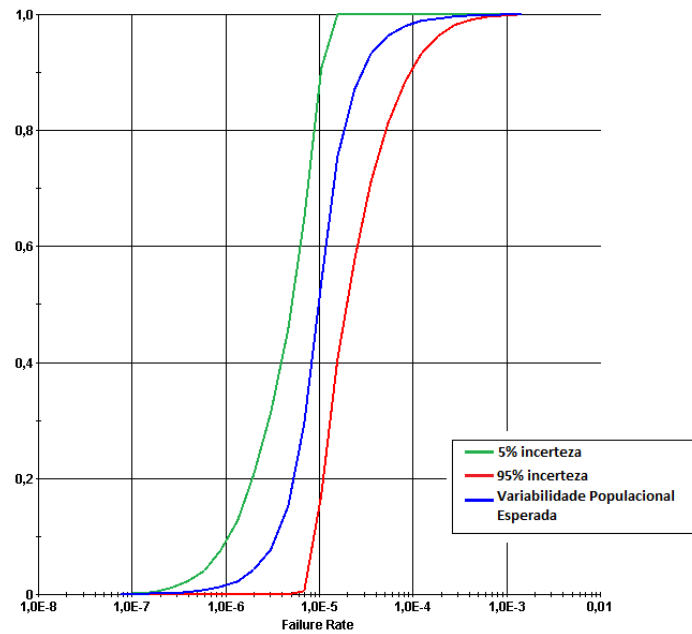


Figura A8: Distribuição acumulada esperada da variabilidade populacional da frequência do Evento Iniciador 05

e) Evento Iniciador 06

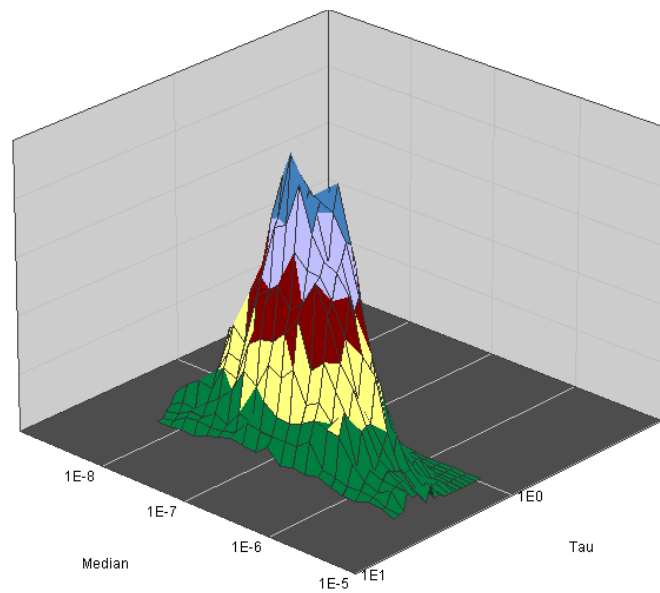


Figura A9: Distribuição a posteriori dos parâmetros da variabilidade populacional – EI06

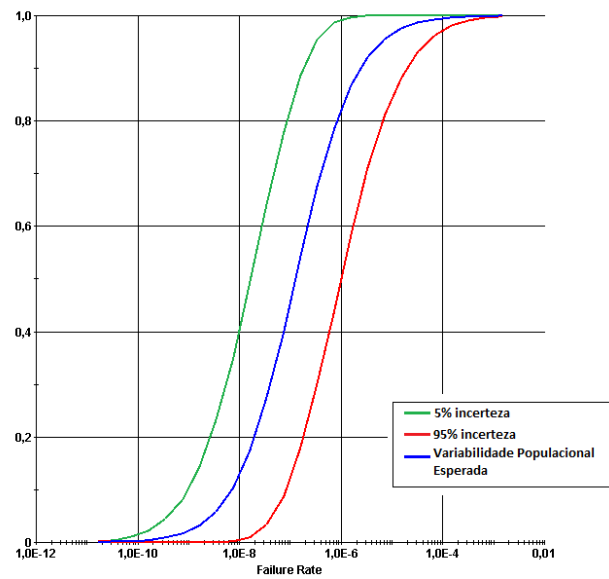


Figura A10: Distribuição acumulada esperada da variabilidade populacional da frequência do Evento Iniciador 06