



Análise de Risco da Instalação de uma Planta de Regaseificação de Gás Natural na Baía de Guanabara

**Gabriel Oliveira de Paula Aroeira
Leonardo Michels Rojas Christo**

Projeto Final de Curso

Orientador

Carlos André Vaz Junior, D. Sc.

Dezembro de 2012

Análise de Risco da Instalação de uma Planta de Regaseificação de Gás Natural na Baía de Guanabara

***Gabriel Oliveira de Paula Aroeira
Leonardo Michels Rojas Christo***

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Engenharia Química.

Aprovado por:

Mariana de Mattos V. M. Souza, D.Sc.

Estevão Freire, D.Sc.

Larissa Barreto Paiva

Orientado por:

Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Dezembro de 2012

Aroeira, Gabriel Oliveira de Paula.
Christo, Leonardo Michels Rojas.
Análise de uma Planta de Regaseificação de Gás Natural na Baía de
Guanabara / Gabriel Oliveira de Paula Aroeira, Leonardo Michels Rojas
Christo, Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2012
106 páginas
(Projeto de Final de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Escola de Química, 2012.
Orientador: Carlos André Vaz Junior
1. Gás Natural. 2. Regaseificação. 3. Segurança. 4. Projeto de Final de
Curso (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Carlos André Vaz Junior. Análise da
Instalação de uma Planta de Regaseificação de Gás Natural na Baía de
Guanabara da Instalação de uma Planta de Regaseificação de Gás
Natural na Baía de Guanabara.

“What we do in life, echoes in eternity”

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, ao professor Carlos André Vaz Junior por sua solicitude e contribuição neste trabalho.

Agradecemos especialmente a Laís Ferreira de Castro, namorada de Gabriel Aroeira, que por toda a compreensão, apoio e carinho neste período acadêmico, tornou-se a maior alegria proporcionada por este curso.

Agradecemos também José Luiz de Paula Aroeira e Marlene Oliveira Santos Aroeira, pais de Gabriel Aroeira, por todo o incentivo, principalmente nos momentos difíceis encontrados.

Agradecemos a André Calza, Arli Duarte, Carlos Nunes, Carlos Eduardo, David Jones, Luiz Rodrigo e Pedro Costa, grandes amigos de Gabriel Aroeira, sempre presentes e prontos para qualquer situação, seja de diversão ou preocupação.

Agradecemos a Michelle Jakeline Cunha Rezende, orientadora de Gabriel Aroeira durante sua iniciação científica, tornou-se mais que uma orientadora, se transformou numa grande amiga que será lembrada para sempre.

Agradecemos especialmente a Anna Tokiko Barbosa Nakayama, namorada de Leonardo Christo, por toda a compreensão e apoio durante este período acadêmico.

Agradecemos também Luiz Rogerio Rojas Christo e Suzy Marie Wilhemine Michels, pais de Leonardo Christo, por todo o incentivo, principalmente nos momentos difíceis encontrados.

Agradecemos ainda a Diogo Sandy, Fernanda Othero, Giuliano Carloni, Luiz Pimenta e Marcio Rangel pela inestimável contribuição profissional ao longo dos 2 anos que Leonardo Christo estagiou na Chevron.

Agradecemos a João Rafael Marins, José Roberto Junior, Guilherme Marques, Bernard Vecci, Felipe Novoa, Luiz Fernando Borges, Vinicius Coutinho e Luiz Otavio Avelar sempre presentes e prontos para qualquer situação, seja de diversão ou preocupação.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau em Engenharia Química.

ANÁLISE DE UMA PLANTA DE REGASEIFICAÇÃO DE GÁS NATURAL NA BAÍA DE GUANABARA

Gabriel Oliveira de Paula Aroeira
Leonardo Michels Rojas Christo

Dezembro, 2012

Orientador: Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

No início da atividade produtiva da indústria do Petróleo, o gás natural era matéria prima que era sequer aproveitada. Contudo, o gás natural ganhou importância e passou a ser utilizado como fonte de energia para as unidades produtoras e, até mesmo na frota veicular brasileira (GNV). Justamente por sua crescente importância, especialmente devido a maior eficiência energética e menor agressividade ambiental, foi instalada uma Unidade de Regaseificação de GNL – gás natural liquefeito – na Baía de Guanabara (RJ), nosso objeto de estudo. O objetivo deste trabalho é realizar uma análise de riscos desta unidade, de modo a identificar os perigos envolvidos nesta atividade e quantificar as probabilidades de ocorrência dos incidentes apontados, além de identificar e quantificar o risco social e individual associado à população que habita as vizinhanças da unidade. Para atingir estes objetivos foram realizadas: Análise Preliminar de Perigos (APR), Análise Quantitativa de Risco (AQR), cálculos de frequências a partir de Árvore de Eventos e estimativa da área afetada pelos incidentes através do *software* ALOHA da EPA (Environmental Protection Agency) e de modelos teóricos consolidados na literatura, como o do TNT equivalente. A instalação estudada foi classificada como segura, uma vez que o acidente de maior severidade é o mesmo de menor probabilidade de ocorrência segundo o método da Análise Quantitativa de Risco.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 A indústria do Gás Natural	1
1.2 Análise de Risco na indústria do GN	4
1.3 Objetivo.....	6
1.4 Estrutura do Trabalho.....	6
2. GÁS NATURAL	7
2.1 Introdução	7
2.2 GNL	10
2.3 Transporte	11
2.4 Mercado Mundial.....	14
2.5 Tendências do GNL no Brasil	18
3. GERENCIAMENTO DE RISCOS	20
3.1 Introdução	20
3.2 Análise Preliminar de Riscos (APR).....	22
3.3 Matriz de Risco.....	28
3.4 Análise Quantitativa de Risco	30
3.4.1 Análise frequencial.....	33
3.4.2 Risco individual.....	34
3.4.3 Risco social	35
3.5 Liberação tóxica	39
3.5.1 Modelos fonte.....	40
3.5.1.1 <i>Flash</i> de líquidos.....	41
3.5.2 Modelos de dispersão.....	41
3.5.2.1 Modelo de dispersão de Pasquill-Gifford	43
3.5.2.2 Modelo de dispersão de Gás Denso.....	46
3.6 Incêndio em poça.....	49
3.7 BLEVE	50

4. RISCOS ASSOCIADOS AO GNL	55
4.1 Histórico de Incidentes com GNL	58
5. ESTUDO DE CASO	61
5.1 Apresentação.....	61
5.2 Análise Preliminar de Risco (APR) e Matriz de Risco	62
5.3 Árvore de Eventos e cálculo das probabilidades dos eventos	67
5.4 Transição rápida de fases (RPT – <i>Rapid Phase Transition</i>)	73
5.5 Cálculo das consequências.....	75
5.5.1 Liberação Tóxica	76
5.5.2 Incêndio em poça	78
5.5.3 BLEVE.....	80
5.6 Risco Social	88
5.7 Risco Individual	90
5.8 Plano de Ação de Emergência (PAE)	90
6. CONCLUSÃO.....	93
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

1. Introdução

O crescimento da indústria mundial vem provocando aumento significativo da competitividade entre empresas, e com ela a necessidade de aperfeiçoamento de processos produtivos. O aperfeiçoamento, por sua vez, tornou a complexidade de plantas industriais ainda maior.

A maior complexidade, em especial nas plantas químicas e petroquímicas, aumenta a preocupação com a segurança de processos. Recentemente a segurança passou a considerar não apenas a área interna da empresa, mas também a comunidade externa direta ou indiretamente atingida.

O estudo dos riscos gerados por processos industriais iniciou-se de maneira formal e organizada nos Estados Unidos, por volta da década de 1940. Este início esteve fortemente relacionado com o aparecimento da indústria nuclear. Com o tempo, a análise de riscos expandiu-se pelos demais tipos de processos, para garantir a segurança de todas as instalações (“Safety Hazard Analyses”) (Filho & Newman, 2001).

No Brasil, o processo de desenvolver análises de segurança ocorreu tardiamente, por volta da década de 1970, com o Decreto-Lei nº 1.413 de 1975. Após a grande poluição ambiental ocorrida na região de Cubatão, que continha no início da década de 1980, 23 complexos industriais e 111 indústrias, surgiu o plano para controle da poluição gerada pelas indústrias. Simultaneamente surgiram exigências que garantiam a boa operação e manutenção de dutovias, equipamentos de terminais de petróleo e produtos químicos, etc. (Consultoria Legislativa da Câmara dos Deputados, 2007). A preocupação com a segurança de processos no Brasil foi fortemente impulsionada pelo grave acidente ocorrido na Refinaria de Duque de Caxias, no Rio de Janeiro, em 1972. Da forma como ocorreu a evolução brasileira na área de segurança pode-se concluir que o país se encaixa na afirmativa de Flohtmann (1993): *“grandes acidentes proporcionam uma mudança de paradigma nas técnicas de segurança”*.

1.1 A indústria do Gás Natural

A indústria do gás natural (GN) é considerada uma “indústria de rede”, ou seja, necessita da implantação de malhas para o transporte e distribuição de seu produto. Ao contrário do petróleo, o gás natural extraído encontra-se no estado gasoso, o que dificulta seu transporte. Segundo Foss (2007), para contornar este problema, foram desenvolvidas complexas redes de gasodutos, ligando

regiões produtoras a mercados consumidores. O transporte de gases através de tubulações é mais eficiente e seguro do que aquele efetuado em rodovias ou ferrovias (Foss, 2007).

A limitação do transporte sempre foi um dos graves entraves a expansão do mercado de gás natural, uma vez que grandes países produtores como URSS e EUA, restringiam-se a distribuir o produto apenas por seus respectivos continentes. Regiões como a Ásia, mais precisamente o Japão, sofriam com a falta do abastecimento dessa fonte de energia alternativa.

Para realizar o transporte intercontinental e suprir a demanda das regiões mais carentes do produto, foi desenvolvido o processo de liquefação do gás natural. Neste, o GN é submetido a um resfriamento criogênico, passando ao estado líquido, apresentando uma redução de aproximadamente 600 vezes em seu volume. No estado líquido, estes hidrocarbonetos podem ser transportados por meio de navios, trens e caminhões criogênicos de forma economicamente viável, além de poder ser estocado com mais facilidade.

A evolução do transporte intercontinental de GN através de sua liquefação, produzindo o denominado “gás natural liquefeito” (GNL), gerou aumento de sua participação na matriz energética mundial. Países carentes de fontes de energia puderam realizar importações e utilizá-lo como alimentação para usinas termoeletricas. Sua utilização como combustível alternativo, mais econômico que a gasolina e o álcool, para veículos automotores também é um fator fundamental para a expansão de seu consumo de mundialmente.

Além de servir como alternativa para geração de energia e como combustível para veículos automotores, o GN extraído nas plataformas de petróleo pode ser utilizado para alimentar a mesma ou até mesmo ser reinjetado nos poços auxiliando na exploração.

A utilização de GNL apresentou um crescimento de 64% entre os anos de 2000 e 2008, como demonstrado na **Figura 1.1**:

O Brasil acompanha o mercado mundial, apresentando crescente utilização de gás natural em sua matriz energética. Através de diversificação de suprimento com negociações de contratos de importação com países da África e do Caribe, e construção de terminais de regaseificação na Baía de Guanabara (RJ) e Pecém (CE), o Brasil investe nessa fonte de energia alternativa ao petróleo.

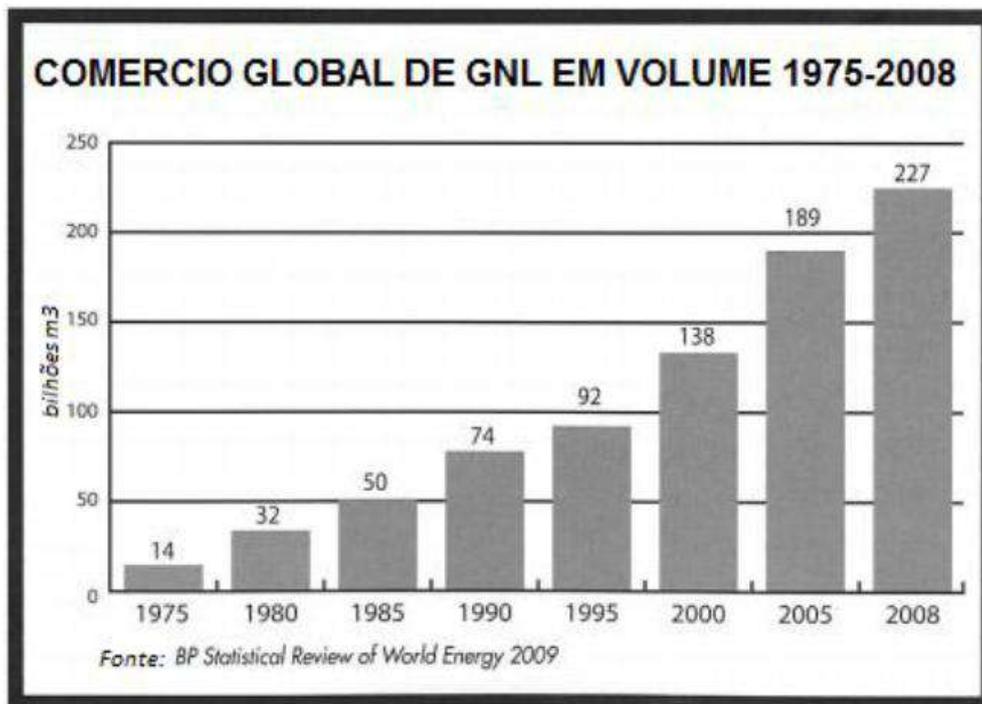


Figura 1.1 – Aumento do consumo de GNL (Shively, 2010).

O uso de GN em termelétricas também se tornou comum no Brasil. Para atender esta demanda específica foi construído o terminal de regaseificação da Baía de Guanabara, com capacidade para regaseificar 14 milhões de metros cúbicos de GNL por dia (Petrobrás, 2007). O terminal cearense (Pecém), por sua vez, tem capacidade de entregar um volume de 7 milhões de metros cúbicos por dia, e a função de suprir as usinas termelétricas da região e parte do mercado industrial da região nordeste (Petrobrás, 2007). A **Figura 1.2** mostra as rotas de GNL referentes ao mercado brasileiro, e as capacidades de processamento dos terminais de regaseificação brasileiros.



Figura 1.2 – Rotas do GNL para o mercado brasileiro (Petrobrás, 2007).

1.2 Análise de Risco na indústria do GN

O GNL tem 95% de sua composição de metano, sendo deste modo potencialmente inflamável. Destaca-se que as liberações de GNL ocorrem em baixíssimas temperaturas, possibilitando a formação de nuvens densas e potencialmente explosivas. Os casos de vazamentos, podem acarretar ainda o congelamento de equipamentos próximos, tais como válvulas e tubulações, além de provocar ferimentos nos operadores. Estas são algumas das razões que justificam o estudo dos riscos associados à indústria do GNL e possíveis formas de prevenção de acidentes. Técnicas muito utilizadas na elaboração desse tipo de estudo são a Análise Preliminar de Riscos (APR), o HAZOP e Árvore de Falhas.

A Análise Preliminar de Riscos (APR) consiste em técnica qualitativa, em forma de tabela, para identificação de perigos potenciais em instalações industriais. Durante a análise, possíveis cenários são identificados e classificados em relação à suas frequência e severidade. O risco atrelado a cada cenário é uma função destes parâmetros sendo obtido através da ferramenta conhecida como Matriz de Risco. Com esta pode-se classificar o risco em cinco categorias distintas: “desprezível”, “menor”, “moderado”, “severo” e “crítico”. A tabela do

APR registra ainda as possíveis causas, consequências e modos de detecção de cada cenário. Com essas informações obtém-se recomendações para minimizar os riscos de acidentes. Através da APR é possível gerar informações úteis para análises subsequentes e mais aprofundadas, como a Análise Quantitativa de Risco.

A Análise Quantitativa de Risco (AQR) consiste em analisar de modo mais preciso e exato a probabilidade e severidade de cada cenário levantado. Sua metodologia de aplicação não visa detectar risco, mas sim quantificá-lo. Dessa forma a AQR permite quantificar, preventivamente, os riscos de eventos como incêndio, explosão, dispersão de nuvem tóxica entre outros, permitindo assim a tomada de decisão quanto a aceitabilidade do risco.

Atualmente as consequências dos diferentes cenários identificados pelas análises de riscos podem ser simuladas através de softwares encontrados no mercado. Estes empregam modelos fenomenológicos ou do tipo caixa-preta, com a finalidade de descrever a dinâmica dos eventos com maior ou menor grau de exatidão. O ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) é um software gratuito capaz simular vazamentos de substâncias químicas, como gases tóxicos ou inflamáveis. A **Tabela 1.1** apresenta as fontes e possíveis cenários obtidos pelo software.

Tabela 1.1 – Fontes e Cenários Considerados no ALOHA

Fonte	Cenários de Toxicidade	Cenários de Incêndio	Cenários de Explosão
Direta			
Fuga Direta	Nuvem de vapor tóxica	Área Inflamável (Flashfire ¹)	ENV ²
Poça (puddle)			
Evaporação	Nuvem de vapor tóxica	Área Inflamável (Flashfire)	ENV
Incêndio (Poolfire)		Poolfire ³	
Tanque			
Sem incêndio	Nuvem de vapor tóxica	Área Inflamável (Flashfire)	ENV
Incêndio		Jetfire ⁴ ou Poolfire	
BLEVE		BLEVE (Fireball e Poolfire)	
Gasoduto			
Sem incêndio	Nuvem de vapor tóxica	Área Inflamável (Flashfire)	ENV
Jetfire		Jetfire	

¹Flashfire: ou “incêndio em nuvem”

² ENV: Explosão de nuvem de vapor

³Poolfire: ou “incêndio em poça”

⁴Jetfire: ou “incêndio em jato”

⁵BLEVE: Boiling Liquid Expending Vapor Explosion

1.3 Objetivo

O objetivo desse estudo é realizar uma análise de risco em um terminal de regaseificação de Gás Natural Liquefeito construído na Baía de Guanabara (RJ). Essa análise terá como base a aplicação dos conceitos de APR (Análise Preliminar de Riscos) e AQR (Análise Quantitativa de Riscos), visando definir possíveis áreas afetadas por acidentes na estação de regaseificação em questão.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está assim organizado: o capítulo 2 apresenta uma descrição do gás natural, seu processo de liquefação e transporte. Descreve ainda algumas características relevantes sobre o mercado do GNL e suas aplicações. O capítulo 3 consiste na descrição das ferramentas utilizadas para a realização de uma análise de risco em uma estação de regaseificação de GNL. O capítulo seguinte descreve os riscos associados a indústria do GN, tais como explosões, incêndio, nuvens tóxicas entre outros e apresenta os principais acidentes ocorridos ao longo da história.

O capítulo 5 consiste na elaboração da análise de risco em si empregando as ferramentas descritas nos capítulos anteriores. Este capítulo apresenta ainda a simulação dos principais riscos identificados. Finalmente o capítulo 6 apresenta as conclusões sobre a segurança para as populações vizinhas diante da operação da estação de regaseificação na Baía de Guanabara.

2. GÁS NATURAL

2.1 Introdução

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos que se encontra em estado gasoso nas condições normais de temperatura e pressão. Sua composição varia de acordo com a região de extração, mas seu componente predominante na maioria dos casos é o metano (CH_4). A região de extração determina seu processo de formação e conseqüentemente as concentrações dos compostos. O gás natural, independente de sua origem, é uma mistura de vários compostos além do metano. Dentre os vários merecem destaque: Etano (C_2H_4), Propano (C_3H_6), CO_2 e N_2 .

Os processos naturais de formação de gás natural são a degradação da matéria orgânica por bactérias anaeróbias, assim como a degradação do carvão por temperatura e pressão elevadas ou da alteração térmica dos hidrocarbonetos líquidos.

Durante o processo de formação do planeta, compostos orgânicos presentes na terra e no mar sofreram degradações dando origem aos compostos hoje conhecidos como “combustíveis fósseis”. Esse processo, quando relacionado a transformação de materiais como celulose, lignina, ou seja matéria orgânica de origem vegetal, deu origem ao chamado querogênio vegetal (Sulgás, 2012).

A degradação da matéria orgânica vegetal deu origem às reservas de carvão do planeta, enquanto que a transformação da matéria orgânica animal, deu origem por sua vez ao chamado querogênio gorduroso (Sulgás, 2012). Enquanto o querogênio vegetal passou pelo processo de cozimento, o querogênio gorduroso não sofreu tal transformação e deu origem ao que hoje denomina-se como petróleo. É comum encontrar reservas de petróleo e gás natural associadas, pois este gás é proveniente dos últimos estágios de degradação do petróleo, onde há um condensado volátil associado a hidrocarbonetos gasosos cujo principal componente é o metano.

Finalmente, ressalta-se que enquanto o gás natural não associado ao petróleo possui mais de 90% de sua concentração de metano, o gás natural associado apresenta concentrações maiores de etano, propano e hidrocarbonetos mais pesados.

A **Figura 2.1** e a **Tabela 2.1** a seguir demonstram as reservas mundiais provadas de gás natural até 2010.



Figura 2.1 – Reservas provadas de gás natural no mundo (CIA, 2010).

Tabela 2.1 – Reservas provadas de gás natural no mundo (CIA, 2010).

País	Gás natural - reservas provadas (metros cúbicos)
Rússia	47,570,000,805,888
Irã	29,609,999,466,496
Catar	25,469,999,120,384
Turquemenistão	7,503,999,926,272
Arábia Saudita	7,460,999,921,664
Estados Unidos	6,927,999,827,968
Emiratos Árabes Unidos	6,071,000,236,032
Nigéria	5,246,000,037,888
Venezuela	4,982,999,875,584
Argélia	4,502,000,238,592
Iraque	3,169,999,912,960
Austrália	3,115,000,004,608
China	3,030,000,074,752
Indonésia	3,000,999,870,464
Cazaquistão	2,406,999,916,544
Malásia	2,350,000,111,616
Noruega	2,313,000,058,880
Usbequistão	1,840,999,956,480
Kuwait	1,797,999,951,872
Canadá	1,753,999,998,976
Egipto	1,655,999,954,944
Líbia	1,538,999,975,936
Países Baixos	1,416,000,045,056
Ucrânia	1,104,000,057,344
Índia	1,074,999,984,128
Omã	849,499,979,776
Azerbaijão	849,499,979,776
Paquistão	840,200,028,160
Bolívia	750,399,979,520
Trinidad e Tobago	436,100,005,888
Argentina	398,399,995,904
Brasil	364,200,001,536

Como pode ser observado, as maiores reservas de gás natural do mundo estão localizadas na Rússia, Irã e Catar. Contudo, as reservas russas correspondem quase ao somatório destes outros dois países. Embora, apareça somente em sexto na lista, e com reservas provadas bem inferiores à da Rússia, o país que mais utiliza gás natural como gerador de eletricidade são os Estados Unidos, sendo responsável por 21% da produção mundial (CEE, 2003). Segundo dados de 2010, o Brasil possuía uma reserva correspondente a menos de 1% da reserva russa.

2.2 GNL

O gás natural liquefeito é obtido pelo processo de liquefação do gás natural após tratamento para remoção de impurezas. O processo de liquefação promove uma redução do volume original em até 600 vezes. Ressalta-se aqui a importância que a remoção das impurezas, em particular a água, seja feita antes do processo de liquefação. A água iria congelar durante o processo, gerando assim efeitos indesejáveis.

A **Figura 2.2** mostra a diferença entre as composições do gás natural bruto e gás natural liquefeito.

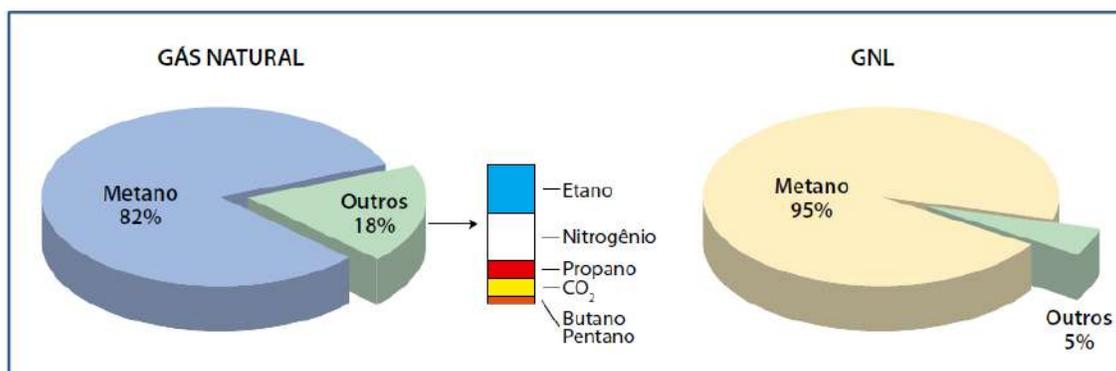


Figura 2.2 – Diferenças entre as composições do Gás Natural Bruto e GNL (ANP, 2010).

Conforme citado nota-se uma diminuição da concentração de impurezas após o processo de liquefação. Com grandes concentrações de metano, o rendimento calorífico do gás natural durante sua utilização, seja no processo de queima em termelétricas ou em veículos automotores, aumenta consideravelmente. A concentração de outros compostos em torno de 5% é predominante de butano e pentano (ANP, 2010).

O aumento da participação do gás natural como fonte energética brasileira através de incentivos governamentais tornou-se tema relevante nos últimos anos. Observa-se aumento no consumo doméstico, na alimentação de termelétricas e em veículos automotores. No entanto, no momento a produção de gás natural brasileiro encontra-se abaixo da demanda pelo mesmo. O projeto do governo brasileiro é contornar este problema através de medidas como a importação de gás natural de um grande produtor, no caso da Bolívia, e investimento em tecnologia para expansão da produção nacional.

Entretanto, a indústria brasileira de gás natural vem enfrentando alguns problemas, onde é possível destacar: a insegurança sobre o fornecimento de gás proveniente da Bolívia, e a estrutura de transporte bastante restrita. Deste modo, a consolidação deste combustível vem sendo prejudicada.

Neste ambiente, a necessidade de aumentar a oferta de gás natural e garantir seu suprimento de forma segura para garantir o atendimento a demanda nacional ganhou importância. Surgiu a necessidade de importar gás natural de outros países além da Bolívia. Dessa forma torna-se possível contornar os problemas de instabilidade política daquele país, que dificultam a manutenção de um abastecimento capaz de suprir a demanda de forma contínua, estável e segura.

Contudo, importar GN de produtores fisicamente afastados, como países africanos, pode ser um problema. O volume de gás a ser transportado é gigantesco. No caso da Bolívia, sua proximidade tornou viável a implementação de gasoduto, não sendo esta, porém, uma solução para o comércio com a África. Para alcançar novas fontes para importação, o governo brasileiro passou a investir na construção de estações de regaseificação de gás natural liquefeito. O transporte do gás liquefeito, ao invés do estado gasoso, é muito mais econômico. Sendo o líquido mais denso que o gás, uma maior massa do material é transportada em um mesmo volume. O volume de GNL facilita assim o seu transporte intercontinental através de navios metaneiros.

2.3 Transporte

O intuito da produção de GNL a partir do GN consiste na máxima redução do volume de material a ser transportado a grandes distâncias. Essa necessidade é especialmente observada quando o transporte via dutos mostra-se inviável. Diante da necessidade de ampliar fornecedores de países a partir dos quais é possível

comprar gás, o Brasil investe em estações de regaseificação e em grandes navios metaneiros. Tais medidas possibilitam a importação de GNL de países com Trinidad e Tobago (Caribe) e Nigéria (África).

O processo de distribuição de gás natural liquefeito envolve diversas etapas, desde sua exploração até a sua destinação. A seguir são definidas seis etapas distintas, baseando-se na classificação adotada pela ANP (ANP, 2010): a) exploração, produção e processamento do gás natural; b) liquefação; c) transporte; d) armazenamento; e) regaseificação; f) distribuição ao mercado consumidor.

As etapas citadas são exemplificadas na **Figura 2.3**:

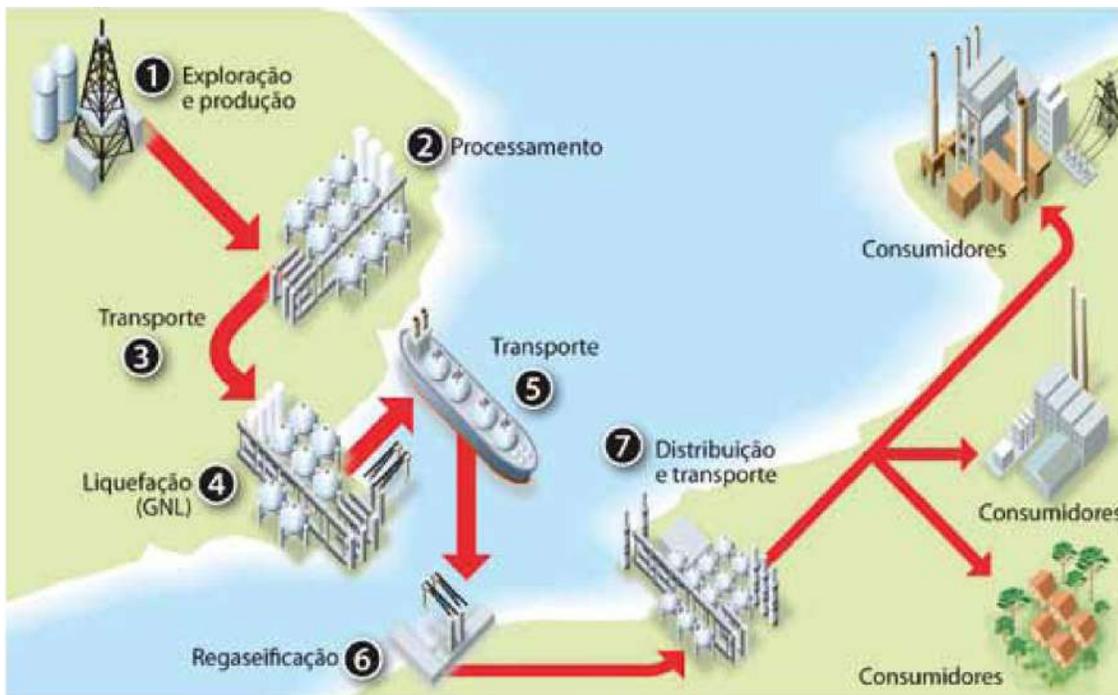


Figura 2.3 – Principais etapas do processo de distribuição de gás natural (ANP, 2010).

O processo de liquefação consiste na transformação do gás natural do estado gasoso para o estado líquido. Conforme citado anteriormente, a composição do gás natural varia de região para região. Além disso, a quantidade de gás natural produzida, também varia regionalmente, influenciando assim diretamente a capacidade de cada planta a ser construída. Dessa forma, as estações de liquefação possuem características bem particulares, tornando-se difícil uma padronização em seus projetos. Entretanto, todas as plantas realizam a mesma

tarefa, que consiste na retirada de impurezas, liquefação do produto e resfriamento até a temperatura de -162°C .

Para transportar GNL a grandes distâncias, como de um continente para outro, faz-se uso dos chamados navios metaneiros. A **Figura 2.4** é referente a um desses navios responsáveis pelo abastecimento do mercado brasileiro:



Figura 2.4 – Navio transportador de GNL (Petrobrás, 2007).

Em países onde há grandes picos de consumo de gás em determinadas épocas do ano, como é o caso dos países do extremo norte, onde a utilização do GNL é para calefação no inverno ou em países onde a queima de gás nas termelétricas serve para suprir o fornecimento de energia nos períodos de grande calor, é necessário um planejamento para que não haja falta no abastecimento. Uma alternativa bastante adotada é a liquefação e armazenamento do gás natural nos períodos onde a demanda é mais baixa, para sua posterior regaseificação nos períodos de pico. As instalações responsáveis por essa operação receberam o nome de “peakshaving”.

2.4 Mercado Mundial

A importância do gás natural na matriz energética mundial já é grande e deve continuar a crescer nas próximas décadas. Seu consumo é impulsionado pelas vantagens ambientais e preços menores, quando comparados com o petróleo. Sua participação na oferta mundial de energia em 2007 era de 20,9%, e deve aumentar para 24,2% até 2030, de acordo com o estudo desenvolvido pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2009).

O comércio de GNL possui características de mercado regional, onde os países exportadores negociam com os países importadores mais próximos, como é o caso de Bolívia e Brasil respectivamente. Por sua vez, a procura por GNL por grandes consumidores, como EUA e Reino Unido, incentivos a formação de exportadores nas regiões do Caribe e África. Entretanto, a demanda era muito superior a oferta que estes países são capazes de fornecer, surgindo a necessidade de novas fontes de importação. A região do Oriente Médio, possuidora de grandes reservas de petróleo e de gás natural, ganhou destaque.

Como resposta a necessidade de importar GNL de países cada vez mais distantes, questões de custo e de segurança do transporte foram avaliadas. Grandes navios transportadores passaram a ser construídos, viabilizando assim o comércio entre diversas regiões.

A **Tabela 2.2** apresenta os volumes transacionados entre as regiões exportadoras e importadoras em 2008, medidos em bilhões de metros cúbicos.

Nota-se que a região da Ásia-Pacífico ainda é a maior exportadora de GNL, reforçando o caráter regional deste mercado. Em segundo e lugar, encontra-se a África, atendendo a demanda europeia (Espanha e França principalmente) e América do Norte (Estados Unidos e Canadá).

As exportações registradas pelas Américas do Sul e Central são realizadas exclusivamente por Trinidad e Tobago, para atendimento principalmente da grande demanda norte-americana, e uma pequena parte para a América do Sul, onde o maior importador é o Brasil. O pequeno valor registrado entre as regiões de América do Norte e Ásia se refere às exportações da Península do Kenai, no Alasca, para o Japão.

Tabela 2.2 – Volumes exportados e importados pelas principais regiões mundiais (ANP, 2010).

Regiões Importadoras	Regiões Exportadoras						Total das Importações
	América do Norte	Américas do Sul e Central	Oriente Médio	Europa	África	Ásia - Pacífico	
América do Norte	-	13,38	-	0,52	10,09	-	23,99
Américas do Sul e Central	-	1,1	-	-	-	-	1,1
Europa	-	2,67	0,14	7,59	42,94	-	53,34
Ásia - Pacífico	1,18	1	-	50,09	8,59	87,12	147,98
Total das Exportações	1,18	18,15	0,14	58,2	61,62	87,12	226,41

Pode-se observar que a região Ásia-Pacífico possui uma demanda de mais de 50% do volume de GNL movimentado, ao passo que a Europa ocupa a segunda posição, onde Espanha e França representam aproximadamente 75% desta demanda. Já a América do Norte, representada predominantemente pelo volume demandado pelos EUA, respondeu por 6,0% da demanda mundial de GNL em 2008. As demandas por parte da América do Sul e Central ainda não são significativas, representando menos de 0,7% da demanda global.

A distribuição das unidades de regaseificação é apresentada na **Tabela 2.3**. O estágio das unidades, tomando por base o ano de 2010 encontra-se classificado em: “operacionais”, “em construção” e “em planejamento” (ANP, 2010). De acordo com os dados apresentados pode-se verificar que estão em operação 64 terminais de regaseificação em 22 países. Japão, Estados Unidos, Espanha e Coréia do Sul detêm aproximadamente 67% das instalações (ANP, 2010).

Tabela 2.3 – Distribuição das plantas de regaseificação pelo mundo (ANP, 2010).

País	Status das plantas de regaseificação			Total
	Operacional	Em construção	Planejada	
Japão	26	3	2	31
EUA	8	2	35	45
Espanha	5	2	1	8
Coreia do Sul	4			4
Reino Unido	3	1	4	8
Itália	2		11	13
Índia	2	1	7	10
França	2	1	2	5
México	2		6	8
Brasil	2		1	3
Turquia	2			2
China	1	2	15	18
Formosa	1	1		2
Chile	1	1		2
Canadá	1		6	7
Argentina	1			1
Bélgica	1			1
Grécia	1			1
Kuwait	1			1
Porto Rico	1			1
Portugal	1			1
República Dominicana	1			1
Tailândia		1		1
Filipinas			3	3
Holanda			3	3
Indonésia			2	2
Paquistão			2	2
Suécia			2	2
TOTAL	64	19	45	198

Em destaque tem-se a quantidade de projetos para terminais em construção ou já aprovados em países como China e Estados Unidos. Independentemente de suas capacidades nominais, verifica-se uma forte tendência para o aumento das relações de importação e exportação de GNL pelo mundo, fortalecendo ainda mais a ideia de diversificação de fontes energéticas. Essa diversificação contribui para uma maior segurança de abastecimento em países onde o petróleo e o carvão mineral são responsáveis pela maior parte da fonte energética disponível.

Na tabela nota-se também que a maior parte das novas instalações de regaseificação estão concentradas na Bacia do Atlântico, totalizando 56 projetos. Esse planejamento deve-se em grande parte a evolução das formas de transporte, com navios de capacidades elevadas. Estes são capazes de transportar o GNL de regiões como o Oriente Médio e África, a países cuja cultura do gás natural está em fase embrionária, como é o caso de Brasil, Argentina e Canadá. O aumento do número de terminais de regaseificação contribui assim positivamente para o estreitamento das relações comerciais entre países.

Analisando ainda os valores apresentados, e supondo que todos os projetos em planejamento serão concretizados, o número de unidades de liquefação terá um crescimento mundial superior a 100%, passando de 88 para 178 instalações.

Ressalta-se que o único país que está presente, atualmente, tanto na lista de importadores quanto exportadores são os EUA, devido a sua grande área territorial e contratos de fornecimento vinculados ao Japão e outros países.

Ao analisar a **Figura 2.5** pode-se notar que o Brasil encontra-se relativamente perto de regiões como Trinidad e Tobago, maior exportador da América Central. Assim como da África, com destaque para Nigéria e Argélia. Conclui-se então que o Brasil está em uma posição geográfica privilegiada em relação ao mercado de exportação de GNL.

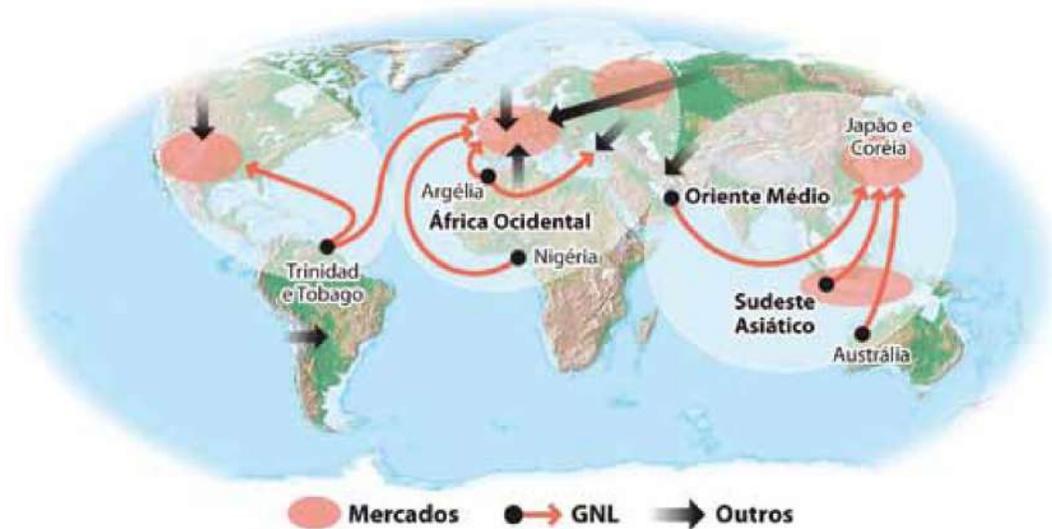


Figura 2.5 – Principais rotas mundiais de exportação de GNL (ANP, 2010).

Com as análises realizadas sobre o tipo de transporte e localização dos possíveis fornecedores de GNL para o mercado nacional, o governo optou então pela construção de duas instalações de regaseificação de Gás Natural Liquefeito (GNL): uma em Pecém (CE), e outra na Baía de Guanabara (RJ).

2.5 Tendências do GNL no Brasil

Devido aos problemas energéticos ocorridos no passado recente, a principal aplicação do GNL no Brasil concentrou-se na área de termelétricas, complementando assim a base hidrelétrica. Além de contribuir para a diminuição de riscos dos chamados “apagões”, o GNL emite menos poluentes do que o óleo diesel, óleo combustível ou carvão mineral, que são comumente aplicados para gerar energia elétrica.

Entretanto, o maior crescimento nos últimos anos concentrou-se no segmento veicular, com a expansão da frota de veículos que empregam este combustível (ANP, 2010).

A dependência do Brasil em relação ao fornecimento do gás boliviano, que atualmente corresponde a 47% do gás disponibilizado internamente (ANP, 2010) dificulta um maior aumento do consumo de gás natural no país.

A produção do gás nacional concentra-se em gás associado proveniente da Bacia de Campos, entretanto o volume extraído da região é muito menor do que a necessidade nacional.

Com o objetivo de tornar o GNL tão competitivo quanto outros combustíveis atualmente utilizados, o governo brasileiro optou por além de manter a importação de gás proveniente da Bolívia, adotar também as seguintes iniciativas:

- Aumento da produção de GN para cerca de 70 MMm³/dia, concentrando-se em gás não associado proveniente das Bacias do Espírito Santo e Santos;
- Investir no transporte marítimo para suprir a demanda nacional através da importação de 20 MMm³/dia;
- Flexibilização da oferta, diversificando as fontes de gás e reduzindo a dependência de um único produtor;
- Menor prazo para implementação quando comparada ao maior tempo exigido para a exploração das reservas de gás recentemente descobertas na costa brasileira.

Para atender a flexibilização da oferta, reduzindo a probabilidade de ocorrerem problemas de fornecimento, negociações com os grandes exportadores de GNL, tais como Trinidad e Tobago e Nigéria, vem sendo estabelecidas através da Petrobrás. Porém o período de maior demanda concentra-se no verão brasileiro, que coincide com o período de maior demanda no hemisfério norte, ou seja, no inverno. Com o intuito de evitar maiores concorrências nas importações, o governo brasileiro está investindo em estações de armazenamento (peakshaving). Deste modo seria possível importar GNL durante o verão europeu.

3. Gerenciamento de Riscos

3.1 Introdução

Segundo Kerzner (1998), “análise de riscos” é o procedimento que visa à avaliação de riscos, ao passo que “gerenciamento de riscos” utiliza a análise para definir estratégias a fim de reduzir os riscos envolvidos nos processos. Ressalta-se aqui o emprego dos termos “gerenciar” e “reduzir”, e não “eliminar”. O risco, por menor que seja, estará sempre presente na operação industrial, em especial nos ramos químicos e petroquímicos.

O principal objetivo da análise de riscos é criterizar e priorizar diferentes cenários de risco, estabelecendo parâmetros que permitam um bom gerenciamento. É importante ressaltar que a avaliação dos riscos envolve tanto a avaliação das incertezas (probabilidade ou frequência) quanto dos seus impactos (consequências ou severidade). Uma empresa de seguros, por exemplo, pode estimar o número de mortes em determinado período de tempo a partir de dados demográficos da população local. Esta estimativa, associada às suas próprias políticas, permite que se faça uma estimativa de quanto deverá ser pago em um determinado período. Obviamente, o objetivo deste procedimento não é obter o valor exato, mas o importante aqui é estimar um valor teórico com o menor desvio possível em relação ao real.

Uma vez obtidos os resultados da análise de risco, o gerenciamento busca definir estratégias a fim de reduzir os riscos envolvidos. No exemplo abordado, de modo a lidar com o risco envolvido no mercado de seguros, a empresa talvez deva revisar sua estratégia de investimentos, alterar elegibilidade dos segurados, reestruturar a política frente a seu público-alvo, e até mesmo aumentar ou cancelar alguns benefícios.

Apesar de específico, o exemplo acima ilustra as possibilidades que um completo estudo de riscos pode oferecer. Esta abordagem pode orientar tomadas de decisões como: reestruturamento de áreas de trabalho, melhorias de processos e procedimentos, redesign de equipamentos e etc.

Ressalta-se porém que o comportamento diante do risco varia de empresa para empresa, isto é, podem haver abordagens e resultados diferentes para um mesmo assunto ou projeto (Bernstein, 1997).

Para Smith e Merritt (2002) o gerenciamento de riscos está atrelado a cinco fases:

- 1- Identificação dos riscos – determinação de todos os riscos envolvidos.
- 2- Análise dos riscos – determinação das causas e consequências envolvidas nos diferentes cenários levantados.
- 3- Mapeamento e priorização – determinação de relevância dos riscos envolvidos, ou de sua priorização.
- 4- Solução dos riscos – cria respostas para os riscos destacados como de maior relevância.
- 5- Monitoramento dos riscos – reavalia o projeto após a implementação das alterações propostas. Essa etapa visa verificar se os riscos anteriores foram reduzidos e identificar novos riscos criados a partir das modificações. Trata-se de uma etapa que promove melhoria contínua.

Wideman (1992) segue a mesma linha de raciocínio, porém detalhando mais profundamente a análise de riscos. Este prevê o uso de abordagens qualitativas e quantitativas.

- 1- Identificação dos riscos – a partir do estudo do processo os riscos e suas causas são identificados.
- 2- Análise dos riscos – divide-se em duas etapas. Na primeira empregam-se técnicas de análise qualitativa visando definir dentre os riscos identificados aqueles mais relevantes. Estes terão suas probabilidades de ocorrência e consequências detalhadas mais profundamente através do emprego de metodologias de análise quantitativa.
- 3- Respostas aos riscos – desenvolvimento, avaliação e implementação de medidas para minimização de riscos, atuando essencialmente nas causas.
- 4- Controle dos riscos – monitoramento de causas e riscos, assegurando execução do plano descrito pelo projeto e documentação de lições aprendidas.

Neste estudo utiliza-se como base a metodologia proposta por Wideman (1992). Uma visão geral do procedimento aqui abordado pode ser verificada na **Figura 3.1**.

Neste capítulo serão apresentadas as teorias de sistemas de análise de risco. Através dos conceitos a seguir enumerados é possível realizar uma estimativa dos riscos atrelados a uma estação de regaseificação instalada na Baía de Guanabara (RJ).

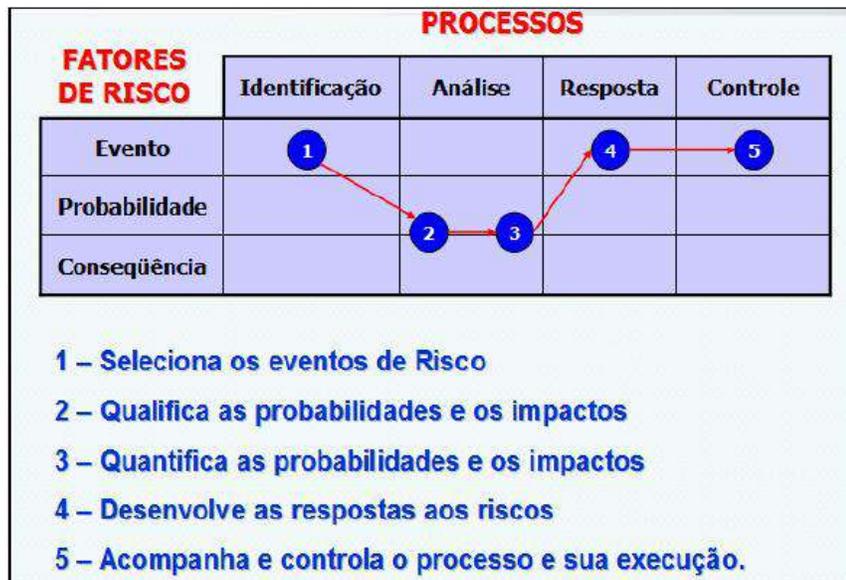


Figura 3.1 – Processos de gerenciamento de riscos (Wideman, 1992 – adaptado).

3.2 Análise Preliminar de Riscos (APR)

A Análise Preliminar de Risco é uma técnica qualitativa de forte importância. Esta análise tem como objetivo apontar os riscos presentes a partir da proposição de diferentes cenários. Através de estudos considerando fatores como o processo empregado, os procedimentos operacionais e de manutenção, a área na qual a planta se encontra instalada, entre outros, é possível identificar cenários de interesse (Halford, Goglia, Stolzer, 2008).

Pode-se concluir que os estudos de APR são desenvolvidos com o intuito de proporcionar à empresa informações do nível de risco de uma dada atividade ou processo, possibilitando assim que seus riscos sejam previamente identificados. Os resultados devem ser utilizados para decidir se uma dada atividade pode ser efetuada, ou seja, se o nível de risco é aceitável. Caso o risco verificado seja considerado inaceitável pode haver necessidade de implantação de medidas de controle para redução de seu nível.

A análise dos resultados deve ser feita a partir da construção de uma tabela de APR, conforme apresentada a seguir. Esta mostra os perigos identificados (eventos), suas possíveis causas, modos de detecção, efeitos potenciais, categorias de frequência e severidade, o risco e as respectivas medidas preventivas.

Conforme apresentado na **Tabela 3.1**, a tabela de APR é composta por 8 colunas que são divididas da seguinte forma:

- 1ª coluna: Perigo Identificado (Evento)

Apresenta os possíveis eventos indesejáveis que podem ocorrer durante a operação da planta. De uma forma geral, são eventos que têm potencial para causar danos aos equipamentos, à propriedade e/ou ao meio ambiente. Esses eventos podem ser exemplificados por: “grandes, médios e pequenos vazamentos de líquido combustível”, “liberação de gás inflamável e/ou tóxico”, “acidentes mecânicos”, entre outros.

- 2ª Coluna: Possíveis Causas

Nesta, são discriminadas as causas de cada possível evento. Estas podem envolver falhas de equipamentos, erros humanos de operação, falhas de manutenção e etc.

- 3ª Coluna: Modo de Detecção

Refere-se a qualquer mecanismo capaz de detectar os eventos descritos na primeira coluna. Esse mecanismo pode ser tanto instrumental (alarmes de pressão, sensores, etc.), quanto percepção humana (visual, odor, etc.).

- 4ª Coluna: Consequências

Apresenta os possíveis danos de cada evento descrito na primeira coluna, como por exemplo: “formação de nuvem de vapor tóxico” e “incêndio em nuvem de vapor inflamável”.

- 5ª Coluna: Frequência

É obtida a partir de bases de dados internacionais ou de registros do departamento de manutenção da empresa. Informações de especialistas ou do fabricante dos equipamentos envolvidos também podem ser empregadas. A APR é uma ferramenta qualitativa, de modo que a frequência é estimada em classes, e não em um valor absoluto. A definição das classes será abordada futuramente neste estudo.

- 6ª Coluna: Severidade

Fornece uma indicação qualitativa da severidade das consequências geradas pela ocorrência de cada evento listado na primeira coluna. Do mesmo modo que as frequências, as severidades também são classificadas em classes.

- 7ª Coluna: Risco

É uma função da severidade e da frequência do cenário avaliado. As classificações compõem a chamada “Matriz de Risco”. Esta fornece uma indicação qualitativa do nível de risco de cada cenário identificado.

- 8ª Coluna: Medidas Preventivas

Expressa as medidas que devem ser tomadas para diminuir o risco atuando junto à frequência, seja na severidade.

É importante ressaltar que um mesmo cenário possui diferentes causas e consequências. Assim, o modo de construção da tabela de APR varia conforme o autor. Alguns pesquisadores adotam uma única linha da tabela apresentando uma única causa e uma única consequência, fazendo assim que um mesmo cenário possua classificações de severidade e frequência diferentes. Outros preferem enumerar todas as causas e consequências relativas a um cenário em uma única linha, concedendo assim uma classificação única de severidade e frequência ao mesmo (Halford, Goglia, Stolzer, 2008).

Tabela 3.1 – Tabela ilustrativa de uma APP Fonte: APP terminal aquaviário - PECEM-TECEM.

Evento	Causa	Deteção	Conseqüências	Freq.	Sev.	Risco	Medidas Preventivas e/ou Mitigadoras
Grande vazamento de produto inflamável durante descarregamento do caminhão até o tanque.	<p>Ruptura catastrófica da linha ou equipamento causada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rompimento total do mangote flexível. • Falha em juntas, conexões e válvulas. <ul style="list-style-type: none"> • Falhas em soldas. • Impacto mecânico associado à falha humana. • Falha operacional. • Causas naturais. • Ações de terceiros. 	<p>-Visual</p> <p>-Instrumental</p> <p>-Ruído.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Perda de produto. • Possibilidade de incêndio em poça. • Possibilidade de formação de nuvem explosiva. • Possibilidade de contaminação do meio ambiente caso haja perda de produto. • Possibilidade de formação de nuvem tóxica. • Possibilidade de causar danos severos a equipamentos e instalações caso haja ignição. 	C	IV	Sério	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de acompanhamento. • Checklist do processo e procedimento operacional. • Manutenção e troca periódica de equipamentos. <ul style="list-style-type: none"> • Sistema interligado a bomba. • Seguir o que determina o plano de emergência do local.

<p>Médio vazamento de produto inflamável durante descarregamento do caminhão até o tanque.</p>	<p>Furo ou ruptura parcial da linha ou equipamento causada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Furo ou rompimento do mangote flexível. • Falha em juntas, conexões e válvulas. • Corrosão. • Impacto mecânico associado à falha humana. • Mau funcionamento da bomba. • Falha operacional. • Causas naturais. • Ações de terceiros. 	<p>-Visual -Manômetro da bomba -Instrumental</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Perda de produto. • Possibilidade de incêndio em poça. • Possibilidade de formação de nuvem explosiva. • Possibilidade de contaminação do meio ambiente caso haja perda de produto. 	<p>C</p>	<p>III</p>	<p>Moderado</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de acompanhamento. • Checklist do processo e procedimento operacional. • Manutenção e troca periódica de equipamentos. • Sistema interligado a bomba. • Seguir o que determina o plano de emergência do local.
--	---	--	--	----------	------------	-----------------	---

<p>Pequeno vazamento de produto inflamável durante descarregamento do caminhão até o tanque.</p>	<p>Pequeno furo ou ruptura parcial da linha ou equipamento:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Furo ou rompimento parcial do mangote flexível. • Falha em juntas, conexões e válvulas. • Corrosão. • Impacto mecânico associado à falha humana. • Mau funcionamento da bomba. • Falha operacional. • Causas naturais • Ações de terceiros. 	<p>-Visual -Manômetro da bomba -Instrumental</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Perda de produto. • Possibilidade de incêndio em poça, Flash Fire. • Possibilidade de contaminação do meio ambiente caso haja perda de produto. 	<p>D</p>	<p>II</p>	<p>Moderado</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de acompanhamento. • Checklist do processo e procedimento operacional. • Manutenção e troca periódica de equipamentos. • Sistema interligado a bomba. • Seguir o que determina o plano de emergência do local.
--	--	--	---	----------	-----------	-----------------	---

3.3 Matriz de Risco

A Matriz de Risco é um recurso simples, mas de grande importância. Com ela é possível analisar de forma qualitativa os riscos de determinada atividade. A Matriz permite ainda priorizar os riscos presentes.

Segundo Wideman (1992), é indispensável definir prioridades, pois em gerenciamento de projetos reais não existe recursos financeiros ou temporais suficientes para que todos os riscos sejam esgotados.

Crowl & Louvar (2011) adotam as seguintes classes de frequência apresentadas na **Tabela 3.2**.

Tabela 3.2 – Categorias de frequência de ocorrência de cenários (Crowl & Louvar, 2011 – adaptado).

Categoria	Denominação	Faixa de Frequência (anual)	Descrição
A	EXTREMAMENTE REMOTA	$f < 10^{-4}$	Conceitualmente possível, mas extremamente improvável de ocorrer durante a vida útil do processo\instalação
B	REMOTA	$10^{-4} < f < 10^{-3}$	Não esperado ocorrer durante a vida útil do processo\instalação.
C	IMPROVÁVEL	$10^{-3} < f < 10^{-2}$	Pouco provável de ocorrer durante a vida útil do processo\instalação.
D	PROVÁVEL	$10^{-2} < f < 10^{-1}$	Esperado ocorrer até uma vez durante a vida útil do processo\instalação.
E	FREQUENTE	$f > 10^{-1}$	Esperado de ocorrer várias vezes durante a vida útil do processo\instalação.

Crowl e Louvar (2011) adotam as seguintes classes de severidade:

Tabela 3.3 – Categorias de severidade dos perigos identificados (Crowl e Louvar, 2011 – adaptado).

Categoria	Denominação	Descrição\Características
I	DESPREZÍVEL	Danos leves aos equipamentos, à propriedades e\ou ao meio ambiente (os danos materiais são controláveis e\ou de baixo custo de reparo; Lesões em empregados, prestadores de serviço ou em membros da comunidade.
II	MARGINAL	Danos severos aos equipamentos, à propriedade e\ou ao meio ambiente; Lesões leves em empregados, prestadores de serviço ou em membros da comunidade
III	CRÍTICA	Danos severos aos equipamentos, à propriedade e\ou ao meio ambiente; Lesões de gravidade moderada em empregados, prestadores de serviço ou em membros da comunidade (probabilidade remota de morte); Exige ações corretivas imediatas para evitar seu desdobramento em catástrofe.
IV	CATASTRÓFICA	Danos irreparáveis aos equipamentos, à propriedade e\ou ao meio ambiente (reparação lenta ou improvável); Provoca mortes ou lesões graves em várias pessoas (empregados, prestadores de serviço ou em membros da comunidade.

Como pode ser verificado, existem quatro categorias de severidades, sendo categorizadas em ordem crescente de cima pra baixo.

Para a formação da Matriz de Risco, posicionam-se os dados obtidos na tabela de frequência horizontalmente, e os obtidos na tabela de severidade verticalmente. Finalmente, cruzam-se estes dados para enfim obter a matriz de risco, conforme apresentado na **Figura 3.2**.

S E V E R I D A D E	FREQUÊNCIA					
	IV	2	3	4	5	5
	III	1	2	3	4	5
	II	1	1	2	3	4
	I	1	1	1	2	3

Figura 3.2 – Matriz de classificação de risco: frequência x severidade (Crowl & Louvar, 2011 – adaptado).

Finalmente, o código de cores adotado na Matriz representa o grau de relevância do risco. As cores mais claras representam faixas de risco menores, enquanto que as cores mais escuras representam os aspectos de maior relevância do projeto, que devem ser focados para evitar maiores perdas e, principalmente, para que haja segurança nas operações. A **Figura 3.3** que categoriza este código de cores.

RISCO
DESPREZÍVEL
MENOR
MODERADO
SÉRIO
CRÍTICO

Figura 3.3 – Legenda da Matriz de classificação de risco: frequência x severidade (Crowl & Louvar, 2011 – adaptado).

Uma vez obtida a Matriz, e dispondo ainda da tabela de APR que reúne as principais informações dos cenários críveis levantados para a planta analisada, pode-se então separar os cenários em diferentes categorias de risco, priorizando-os.

3.4 Análise Quantitativa de Risco

Quando os riscos definidos na análise qualitativa são considerados inaceitáveis, devem ser propostas medidas para redução dos mesmos. O conceito de “risco aceitável” é difícil de ser determinado com exatidão. Parâmetros e diretrizes vão

orientar a tomada de decisão quanto a segurança do processo ou operação avaliada (AIChE, 2000).

Na ótica de uma análise quantitativa de riscos, um risco dado como inaceitável, seria aquele que, ao cruzar os dados de frequência e severidade, resultasse em uma hipótese que fosse incluída dentro da faixa de risco sério ou crítico (AIChE, 2000).

Atualmente com os conceitos de melhoria contínua atrelados à visão dos Sistemas de Gestão, sugere-se que mesmo com os riscos aceitáveis sejam tomadas ações como as sugeridas durante a APR para minimizar os riscos existentes, sempre tendo em vista, obviamente, mitigar os riscos de forma economicamente viável. Isto é, deve-se encontrar um ponto ótimo de modo a garantir que a operação seja segura e lucrativa (AIChE, 2000).

O risco é uma função das consequências e das frequências, portanto, para que seja de fato calculado é necessário estabelecer valores para as frequências de cada uma das hipóteses acidentais levantadas. Para definição das frequências muitas vezes são adotados bancos de dados de amplo emprego prático, tais como OREDA e WOAD.

Além da frequência é necessário avaliar os cenários quanto aos modelos de efeitos, mensurando suas severidades.

Abaixo segue uma lista de consequências, conforme apresentadas pela norma **CETESB P4.261** (CETESB, 2003):

- **Liberação de material e/ou energia de acidente estocástico:** qualquer ocorrência anormal que resulte na liberação do produto para o meio ambiente, podendo ocorrer em qualquer equipamento da instalação operacional, não estando necessariamente associada a uma emergência.
- **Incêndio em nuvem (flash fire):** Combustão de uma mistura de ar e vapor inflamável, na qual, a chama percorre a nuvem com uma velocidade inferior a velocidade sônica, de modo que a sobrepressão gerada é desprezível para causar danos.
- **Jato de fogo (jetfire):** É o fenômeno que ocorre quando um gás inflamável escoar a alta velocidade e encontra uma fonte de ignição próxima ao ponto de vazamento.

- **Explosão:** Explosão de uma mistura combustível-oxidante em um sistema aberto. Se houver ignição, a velocidade da chama pode chegar a altas velocidades e produzir sobrepressão capaz de causar destruição.
- **Concentração tóxica:** É a concentração atingida por substâncias tóxicas, após um vazamento ou exposição prolongada, capaz de provocar danos, permanentes ou não, ao homem.
- **Incêndio em Poça:** tem início com o vazamento do produto para o ambiente, com formação de poça que, não encontrando nenhuma barreira, tende a se espalhar. Sobre a poça, forma-se uma fase vapor, que mistura-se ao ar atmosférico ocorrendo assim um incêndio.
- **Bleve** (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*): trata-se de um fenômeno resultante da explosão catastrófica de um reservatório pressurizado de líquido, em que a temperatura atinge valores superiores a temperatura de ebulição normal do componente. A explosão decorrente do fenômeno projeta fragmentos a longas distâncias, caracterizando assim um acidente de alta gravidade.

O GNL, especificamente, apresenta além dos cenários identificados pela CETESB, outros particulares:

- **Congelamento:** A baixa temperatura de armazenamento do GNL faz com que, uma vez ocorrido vazamento para o meio ambiente, o composto “roube” calor do meio para sofrer vaporização. A rápida troca térmica tende a promover o congelamento de objetos próximos, além de ser potencialmente fatal para seres humanos. É importante ressaltar ainda que o congelamento de equipamentos, em especial válvulas, pode contribuir para gerar graves acidentes, como aquele observado no parque de estocagem de GLP da Refinaria de Duque de Caxias na década de 70 (Sindipetro, 2011).
- **Rollover:** Fenômeno de convecção devido às diferenças de densidade do GNL. A movimentação pode ocasionar vazamentos pelas válvulas de alívio e rachaduras nos tanques. Este evento pode ser facilmente evitado com a implementação de procedimentos operacionais adequados, como sensores de vazamentos e manutenção adequada dos tanques (FOSS, 2007; FLYNN, 2005).
- **Asfixia:** Se caracteriza como dificuldade respiratória, com possível perda de consciência devido à falta de oxigenação no cérebro. Embora possa ocorrer em qualquer vazamento, é especialmente relevante quando a liberação ocorre em espaços confinados (FOSS, 2007; FLYNN, 2005).

3.4.1 Análise frequencial

A análise da frequência dos cenários acidentais é realizada por Árvores de Eventos (AE), que cobrem a sequência lógica de propagação do evento desde seu início até as consequências, como incêndio, explosão ou simples dispersão da substância (USP, 2011).

O objetivo principal da AE é orientar o cálculo das frequências de cada evento através do estabelecimento de uma sequência lógica.

A **Figura 3.5** ilustra a metodologia aplicada neste trabalho:

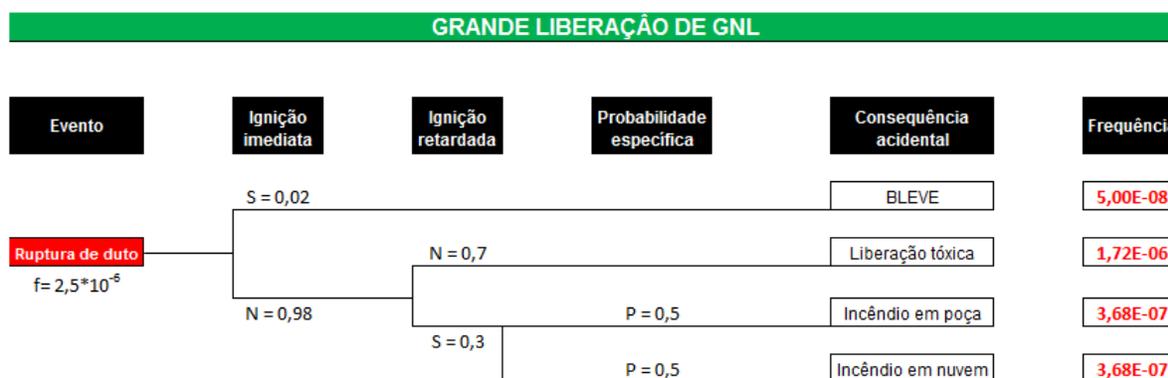


Figura 3.5 – Exemplo de árvore de eventos da unidade de regaseificação de GNL.

As probabilidades de ignição imediata, ignição retardada, probabilidade específica e evento iniciador foram consultadas no TNO (TNO,2005).

Como pode ser entendido a partir da figura acima, nas colunas questiona-se sobre a ocorrência de ignição imediata (no local). Se afirmativo, pode ocorrer, por exemplo, um BLEVE. Não havendo ignição imediata do produto liberado, as perguntas subsequentes referem-se à probabilidade de deslocamento da nuvem e ocorrência de ignição retardada desta, resultando em incêndio em nuvem ou incêndio em poça, dependendo das condições. Caso não haja ignição, o incidente esperado seria uma liberação tóxica.

Após a construção das Árvores de Eventos, a frequência de cada cenário acidental é obtida multiplicando-se a frequência dos eventos iniciadores pelas probabilidades de cada uma das ramificações dos itens do cabeçalho da AE.

3.4.2 Risco individual

O Risco Individual pode ser definido como a probabilidade de que um indivíduo, situado nas imediações de uma instalação perigosa, venha a sofrer um dano ao longo de um intervalo de tempo de 1ano, em decorrência de acidentes na instalação (USP, 2011). Os níveis de dano dependem de características particulares, mas certamente estão relacionados a:

- Perda de vida;
- Ferimentos graves e leves.

O critério de tolerabilidade ao Risco Individual proposto pela Norma P4.261 da CETESB (2003) é idêntico ao utilizado em diversos países como: Inglaterra, Holanda, Austrália, Estados Unidos e Suíça.

Segundo a CETESB (2003), valores de risco individual superiores a 10^{-5} /ano são considerados intoleráveis, e valores abaixo de 10^{-6} /ano são considerados toleráveis. Para os valores de riscos situados na região denominada ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*), compreendidos entre os dois limites, deverão ser introduzidas modificações nas instalações e/ou operações de modo que o novo valor de risco seja reduzido. Porém, estas modificações deverão considerar, a viabilidade econômica do projeto e a relação custo-benefício obtida. Ou seja, os riscos serão mitigados de modo a torná-los o menor possível (CETESB, 2003). A figura 3.6 ilustra a divisão mencionada.

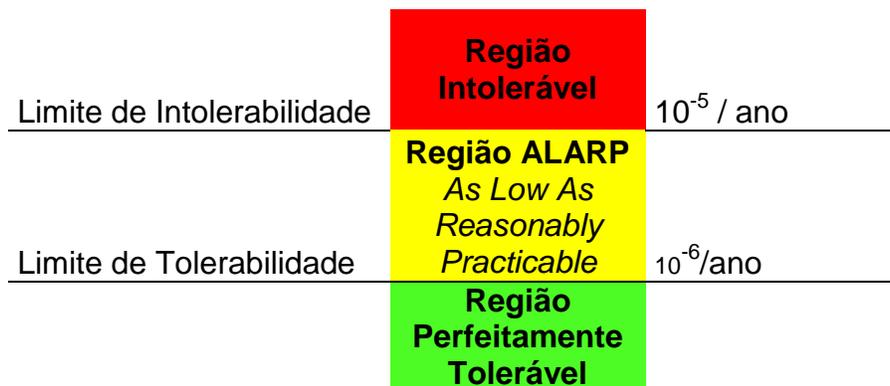


Figura 3.6 – Critério de tolerância de risco individual (CETESB, 2003).

Os riscos individuais de uma instalação podem ser expressos através dos chamados "contornos de risco individual" ou "contornos de iso-risco". Esses contornos ligam os pontos de mesmo nível de risco, fornecendo uma indicação gráfica dos níveis nas imediações de uma dada instalação. Conhecendo-se a

distribuição populacional na região, pode-se então determinar se algum grupo específico está submetido a níveis intoleráveis de risco individual.

O Risco Individual num determinado ponto (x,y) relacionado a uma determinada planta industrial é resultado da contribuição de diferentes valores de risco para cada um dos eventos acidentais (i) possíveis, dessa forma, estes valores podem ser somados conforme equação a seguir (USP, 2011):

$$\sum_{i=1}^N RI_{x,y,i} = \sum_{i=1}^N f_i * p_{fi}$$

Onde,

- n = número total de cenários acidentais considerados na análise;
- $RI_{x,y,i}$ = risco de fatalidade no ponto x,y devido ao evento i ;
- f_i = frequência de cada cenário acidental;
- p_{fi} = probabilidade que o evento i resulte em fatalidade no ponto x,y .

A **Tabela 3.4** apresenta riscos individuais característicos de alguns setores industriais.

Tabela 3.4 – Risco individual associado a diferentes indústrias (Lees, 1996).

Indústria	Risco Individual dos empregados
Acrilonitrila	$6,6 \times 10^{-6}$
Amônia	$2,0 \times 10^{-6}$
Cloro	$5,1 \times 10^{-5}$
GNL	$5,7 \times 10^{-9}$
Propileno	$7,7 \times 10^{-7}$

3.4.3 Risco social

O risco social de um dado evento acidental está diretamente relacionado com o número de pessoas expostas às possíveis consequências associadas a este (CETESB, 2003). Seu cálculo é feito a partir da frequência esperada de ocorrência de cada evento acidental e da estimativa de fatalidades geradas.

A diferença entre o risco individual e social pode ser ilustrada no seguinte exemplo: o escritório da empresa A está localizado próximo de uma rede de dutos condutores de gás natural, e nela trabalham, durante horário comercial, 100 pessoas, há também um vigia que trabalha no período noturno.

Como a qualquer instante existe a probabilidade de ocorrência de acidente nesta rede de dutos, e se este incidente pode causar fatalidades no escritório da empresa A, cada indivíduo naquele edifício estará sujeito a certo risco individual. Este risco individual é independente do contingente, isto é, o risco é o mesmo para cada um dos 100 funcionários diurnos e também para o vigia.

Contudo, o risco social é menor durante o período noturno, visto que somente o vigia poderia ser afetado pelo incidente.

Resumindo, o risco individual depende somente da atividade realizada, enquanto que o risco social leva em conta o número de pessoas envolvidas no incidente (AIChE, 2000).

O cálculo do risco social médio será feito a partir da seguinte equação:

$$R_s = F_c \times N_p$$

Onde:

R_s é o risco social médio relacionado à unidade de regaseificação de GNL;

F_c é frequência esperada de ocorrência do cenário acidental (eventos/ano);

N_p é o número de fatalidades associada ao evento de frequência F_c (fatalidades/evento).

O número de pessoas externas as instalações e expostas a possíveis acidentes é função do raio da consequência acidental, obtido através da simulação usando modelos fenomenológicos.

Cabe lembrar que os raios de consequências que não ultrapassem o limite da área da empresa não serão considerados no cálculo dos riscos. No Brasil, o órgão responsável pela avaliação das condições de segurança do trabalho no interior das empresas é o Ministério do Trabalho e Emprego. Este emprega avaliações diferentes daquelas propostas pela CETESB.

A planilha para cada hipótese acidental é composta por diversas colunas que contém as seguintes informações referentes às tipologias acidentais:

- Frequências acidentais (expressa em fatalidades/ano);
- Porcentagem de fatalidade associada a cada evento acidental (dependente dos níveis e consequências avaliados);
- Alcance em metros do raio de consequência avaliado.
- Fator multiplicativo – de acordo com o CETESB (2003), a estimativa de vítimas fatais pode ser calculada a partir das probabilidades médias de morte. Isto é, deve-se aplicar a probabilidade de 75% de fatalidade para indivíduos situados entre a fonte do vazamento e a curva de 50% de fatalidades, e deve-se aplicar a probabilidade de 25% para indivíduos situados entre a curva de 50% e 1% de fatalidades.
- Área da consequência acidental (m^2) – área que atinge a população externa à unidade.
- Danos (distância x pessoas expostas – expressa em fatalidade/ocorrência);
- Riscos (frequência x dano – expressa em fatalidade/ano).

O resultado do risco social também pode ser apresentado na forma de Curva F-N(CETESB, 2003), o qual fornece a frequência acumulada de ocorrência de acidentes com N ou mais fatalidades, conforme a **Figura 3.7**:

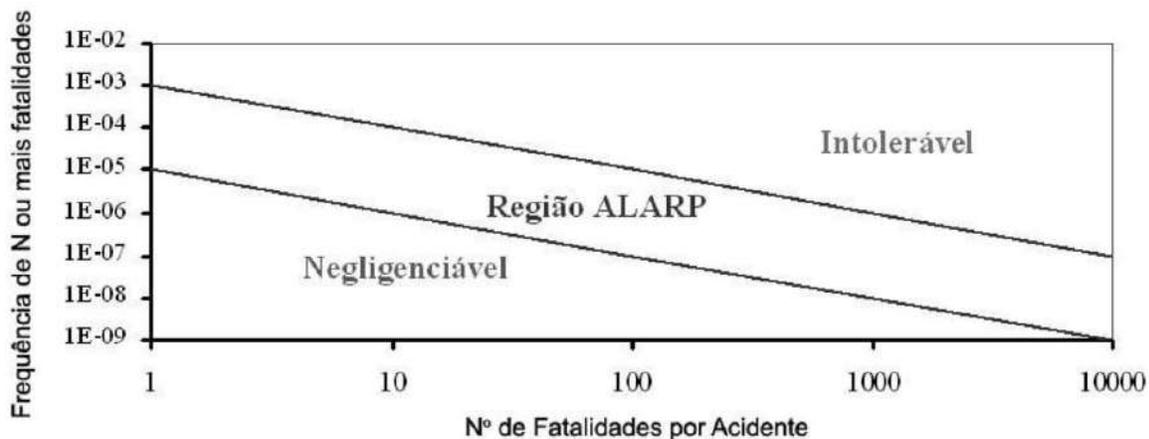


Figura 3.7 – Curva F-N de tolerabilidade para o risco social (USP, 2011).

A **Tabela 3.5** será utilizada neste estudo para apresentar os riscos por tipologia e o risco social médio, considerando-se os cenários que envolvem fatalidades conforme a área de perigo definida pela simulação.

Tabela 3.5 – Planilha a ser utilizada na estimativa do risco social atrelado à unidade de regaseificação de GNL.

Evento iniciador	Frequência (ocorrência/ano)	% Fatalidade	Alcance (m)	Fator multiplicativo	Área da conseq. Acidental (m ²)	Número de Pessoas expostas externa à unidade	Danos (Fatal./ocor.)	Risco (Fatal./ano)
SISTEMA 1								
HIPÓTESE ACIDENTAL 1.1								
Dia								
Noite								

3.5 Liberação tóxica

A liberação tóxica de um determinado componente químico é modelada a partir de modelos fonte e modelos de dispersão. Isto é, parte-se da premissa que todo o volume vazado é originário de um determinado ponto ou fonte, e que ele se dispersa segundo um padrão característico (Crowl & Louvar, 2011).

Para determinar o quão nociva é uma liberação tóxica necessita-se buscar na literatura informações acerca dos limites de toxicidade deste material. Desta forma, ao estimar a área afetada, determinam-se também os efeitos esperados na população.

De acordo com a norma CETESB P4.261 (CETESB, 2003) em relação ao nível de toxicidade existem dois parâmetros importantes: a CL_{50} e a DL_{50} .

A CL_{50} é a concentração um determinado componente químico a temperatura de 25°C e pressão de vapor superior a 10 mmHg, administrada por via respiratória para ratos ou camundongos, que é letal para 50% dos indivíduos desta espécie. A **Tabela 3.6** apresenta os valores de referência para este parâmetro, e classificação quanto ao nível de toxicidade de uma determinada substância, conforme a norma CETESB P.4.261 (CETESB, 2003):

Tabela 3.6 – Classificação quanto ao nível de toxicidade de uma substância em função do tempo de exposição (CETESB, 2003).

Nível de toxicidade	C (ppm.h)
4 - Muito tóxica	$C \leq 500$
3 - Tóxica	$500 < C \leq 5000$
2 - Pouco tóxica	$5000 < C \leq 50000$
1 - Praticamente não tóxica	$50000 < C \leq 150000$

Quando os valores de CL_{50} não estiverem disponíveis, deverão ser aplicados os valores de DL_{50} – dose letal a temperatura de 25°C e pressão de vapor superior a 10 mmHg administrada por via oral para ratos ou camundongos. A **Tabela 3.7** apresenta os valores de referência para este parâmetro e classificação quanto ao nível de toxicidade de uma determinada substância, conforme com a norma CETESB P.4.261 (CETESB, 2003).

Tabela 3.7 – Classificação quanto ao nível de toxicidade de uma substância em função da massa do indivíduo (CETESB, 2003).

Nível de toxicidade	DL₅₀(mg/kg)
4 - Muito tóxica	DL ₅₀ ≤ 50
3 - Tóxica	50 < DL ₅₀ ≤ 500
2 - Pouco tóxica	500 < DL ₅₀ ≤ 5000
1 - Praticamente não tóxica	5000 < DL ₅₀ ≤ 15000

3.5.1 Modelos fonte

Modelos fonte são construídos a partir de equações fundamentais ou empíricas, de modo a representar os processos físico-químicos que ocorrem durante o vazamento (Crowl & Louvar, 2011).

Conforme mencionado, a essência do modelo fonte baseia-se na simples premissa de que todo o vazamento de uma dada substância parte de um determinado ponto ou fonte.

O objetivo principal destes modelos é obter como resposta uma taxa mássica ou volumétrica de vazamento. Contudo, estes resultados são apenas uma estimativa, que muitas vezes não serão necessariamente compatíveis com os dados reais.

Existem diversos tipos diferentes de modelos fonte, dentre os quais se destacam (Crowl & Louvar, 2011):

- Fluxo de líquido por um furo;
- Fluxo de líquido por um furo em um tanque;
- Fluxo de líquidos através de tubulações;
- Fluxo de vapor por um furo;
- Fluxo de gases através de tubulações;
- *Flash* de líquidos;
- Evaporação de poça líquida.

Para os objetivos específicos deste trabalho, será abordado o *flash* de líquidos, visto que este é o modelo fonte que melhor se adequa às condições de vazamento de uma unidade de regaseificação de GNL.

3.5.1.1 *Flash* de líquidos

O GNL em condições de processo é armazenado no estado líquido a -162°C e, ao ser submetido a condições ambientais, é esperado que este passe imediatamente para a fase gasosa, sofrendo *flash*.

Segundo Crowl & Louvar (2011), o *flash* de um líquido ocorre tão rapidamente que o processo pode ser considerado como, aproximadamente, adiabático. Se o caminho percorrido pela substância durante o vazamento é superior a 10 cm – evento observável em tubulações e em tanques com grande espessura de parede – as condições de equilíbrio são atingidas e o vazamento ocorre em fase gasosa. Para estimativa de sua taxa mássica de vazamento deve-se utilizar a seguinte equação (Crowl & Louvar, 2011):

$$Q_m = AC_0 \sqrt{2\rho_f g_c (P - P_{sat})}$$

Onde,

Q_m = taxa mássica da substância liberada (kg/s)

A = área da seção transversal ao vazamento (m^2)

C_0 = coeficiente de descarga (adimensional)

ρ_f = densidade do fluido (kg/m^3)

g_c = constante gravitacional ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{N}\cdot\text{s}^2$)

P = pressão no tanque (N/m^2)

P_{sat} = pressão de saturação da substância na temperatura ambiente (N/m^2)

Dentre as variáveis acima, nota-se que existe um parâmetro empírico: o “coeficiente de descarga”, que se trata de uma constante que varia de 0 a 1. Esta visa corrigir a taxa mássica em função das condições de vazamento. Sabe-se que para tubos pode-se assumir valor de 0,61. Contudo, quando o objetivo é obter resultados mais conservadores deve-se assumir este parâmetro como 1,0 (Crowl & Louvar, 2011).

3.5.2 Modelos de dispersão

Os modelos de dispersão descrevem o transporte de substâncias químicas na forma de gás ou vapor pelo ar. Estes modelos dividem-se em dois grupos: modelos de lançamento contínuo que formam plumas e modelos de lançamento instantâneo que formam *puff*.

Assim, modelo de formação de pluma é típico de liberações contínuas, isto é, modelos em que uma determinada vazão mássica é liberada continuamente ao longo do tempo (Crowl & Louvar, 2011).

O modelo formador de *puff* é típico de liberações instantâneas, isto é, parte-se da premissa que todo o volume vazado é liberado de uma única vez em um determinado instante temporal (Crowl & Louvar, 2011).

De acordo com Crowl & Louvar (2011), diversos parâmetros influenciam diretamente a dispersão, sendo os principais listados a seguir:

- Velocidade do vento;
- Estabilidade atmosférica;
- Condições de superfície (prédios, árvores, água);
- Altura do ponto de vazamento em relação ao solo;
- Momento e fluabilidade do material liberado.

A velocidade do vento influencia diretamente o formato da nuvem. Isto é, em grandes velocidades de vento a tendência é que a nuvem seja mais longa e estreita. Ao passo que em velocidades menores, a nuvem tende a ser mais curta e larga.

A estabilidade atmosférica está associada às condições de mistura do ar, e pode ser determinada empiricamente a partir das condições ambientais encontradas na região quando do vazamento. Existem três classes de estabilidade atmosférica: “estável”, “neutra” e “instável”.

Em condições de estabilidade atmosférica instável, o sol aquece o solo mais rapidamente que o ar. Então, são observadas maiores temperaturas próximas ao solo e menores em regiões de maior altitude (este fenômeno é observado principalmente nas primeiras horas da manhã). Como camadas de ar de menor densidade estão posicionadas abaixo de camadas de maior densidade, o aquecimento irá promover turbulência atmosférica por convecção (Crowl & Louvar, 2011).

Em condições de estabilidade atmosférica neutra, o ar sobre o solo aquece e sua velocidade aumenta, desta forma reduzindo o efeito que seria gerado pela energia solar, isto é, a turbulência atmosférica é minimizada.

Em condições de estabilidade atmosférica estável o sol não consegue aquecer o solo tão rápido quanto este se resfria, então, são observadas menores temperaturas próximas ao solo e maiores em regiões de maior altitude. Como camadas de ar de menor densidade estão posicionadas abaixo de camadas de maior densidade, o efeito de turbulência será suprimido (Crowl & Louvar, 2011).

É importante destacar que as condições de superfície irão influenciar diretamente a taxa de mistura do ar e os perfis de velocidade dos ventos com a altura. Por exemplo: árvores e prédios favorecem mistura do ar, ao passo que lagos e campos abertos reduzem esta taxa de mistura.

A altura de onde parte o vazamento influencia tanto as concentrações ao nível do solo, quanto o alcance da nuvem e, portanto deve ser especificado ao rodar o modelo de dispersão (Crowl & Louvar, 2011).

Por fim, a flutuabilidade e o momento dos gases quando do vazamento, influenciam a altura efetiva atingida pela liberação. Quanto maior a momento do gás no ponto de vazamento, maior será a altura que ele irá atingir. Quanto menor for a densidade do gás em relação ao ar (flutuabilidade positiva), maior será o efeito de flutuabilidade e maior será a altura atingida pelo vazamento.

Existem duas principais metodologias para estimar modelos de dispersão: o modelo de Pasquill-Gifford e o modelo de gás denso. Estes dois modelos são discutidos nos próximos itens.

3.5.2.1 Modelo de dispersão de Pasquill-Gifford

A solução geral para a dispersão atmosférica de determinada substância foi determinada por Sutton (1953) através do coeficiente de dispersão(σ). Sutton através de experimentos chegou à seguinte equação:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{2} < C >^2 (ut)^{2-n}$$

Onde,

σ = é o coeficiente de dispersão na direção x;

$\langle C \rangle$ = é a concentração da substância tóxica liberada;

u = é a velocidade de escoamento do fluido;

t = é o tempo de vazamento

n = é o parâmetro afetado pela estabilidade atmosférica.

Os coeficientes de dispersão são função da distância à fonte e das condições de estabilidade atmosférica (Crowl & Louvar, 2011). A **Tabela 3.8** apresenta as classificações quanto à estabilidade atmosférica de acordo com este modelo. Cabe mencionar que A e B representam estabilidade atmosférica instável, C e D estabilidade atmosférica neutra, enquanto E e F estabilidade atmosférica estável.

Tabela 3.8 – Classes de estabilidade atmosférica segundo o modelo de dispersão de Pasquill-Gifford (Crowl & Louvar, 2011).

Velocidade do vento (m/s)	Dia			Noite	
	Forte	Moderada	Fraca	mais de 4/8 do céu nublado	até 3/8 do céu nublado
< 2	A	A-B	B	F	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-4	B	B-C	C	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

A **Figura 3.8** e a **Figura 3.9** ilustram as diferenças observadas nos modelos de dispersão por puff e por pluma.

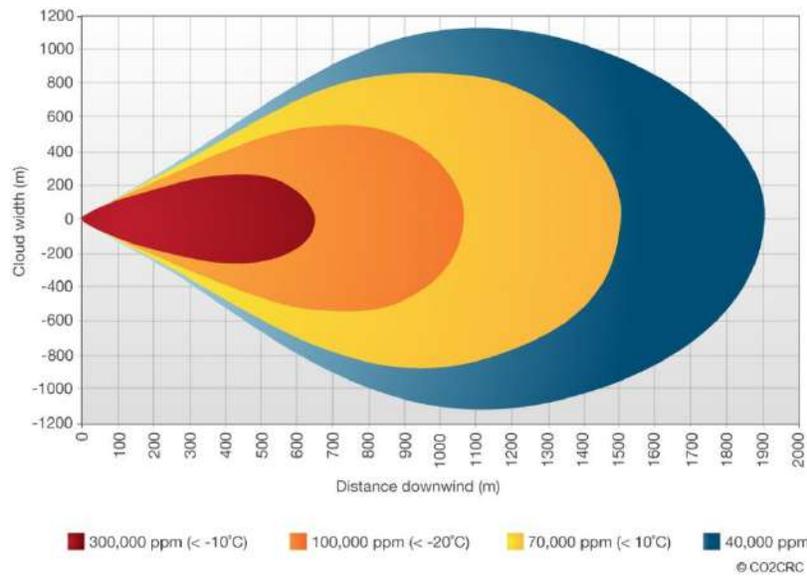


Figura 3.8 – Resultado de modelagem de modelo de dispersão em pluma (CO2CRC, 2012).

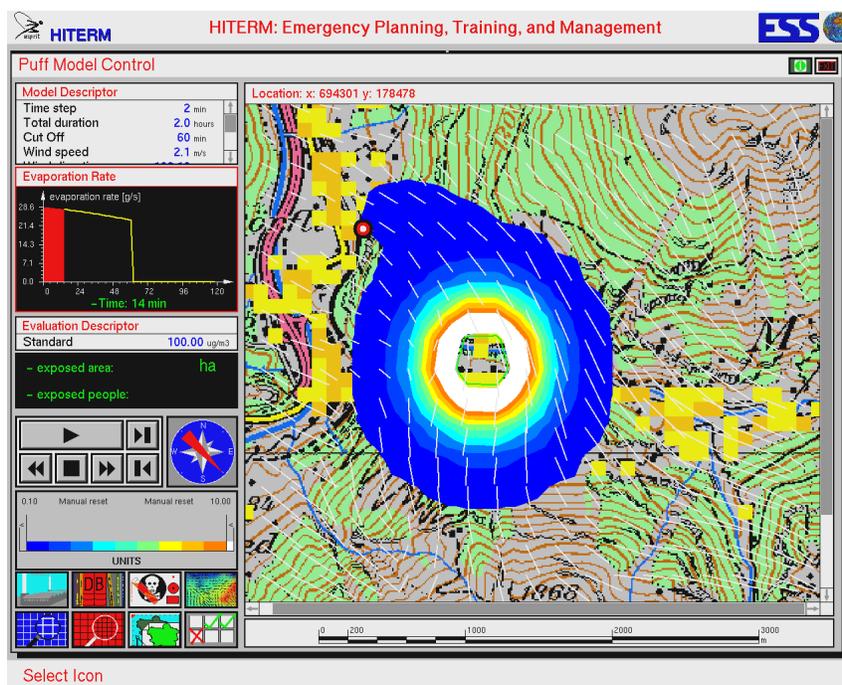


Figura 3.9 – Resultado de modelagem de modelo de dispersão em puff (ESS, 2012).

3.5.2.2 Modelo de dispersão de Gás Denso

O modelo de gás denso pode ser aplicado a qualquer gás, desde que este esteja em condições nas quais se apresente mais denso que o ar atmosférico. O modelo requer especificação do volume inicial da nuvem, do fluxo volumétrico, duração do vazamento, densidade inicial do gás, a velocidade do vento 10 m acima do ponto de origem da liberação e distância na direção do vento a ser considerada (Crowl & Louvar, 2011).

Primeiramente, deve-se verificar se o modelo é, de fato, aplicável através da equação:

$$g_0 = g (\rho_0 - \rho_a)\rho_a$$

Onde,

g_0 = é o fator de flutuabilidade inicial (m/s^2);

g = é a aceleração gravitacional (m/s^2);

ρ_0 = é a densidade inicial do fluido (kg/m^3);

ρ_a = é a densidade do fluido ambiente (kg/m^3).

É necessário ainda definir a distância característica da fonte que depende essencialmente do tipo de liberação considerada, isto é, contínua ou instantânea.

Para modelos baseados em liberação instantânea têm-se que a distância característica da fonte é calculada pela seguinte equação:

$$D_i = V_0^{1/3}$$

Onde,

D_i = é a distância característica da fonte para liberações instantâneas;

V_0 = é o volume inicial de gás denso liberado para o ambiente.

Para modelos baseados em liberação contínua têm-se que a distância característica da fonte é calculada pela seguinte equação:

$$D_c = \left(\frac{q_0}{u}\right)^{1/2}$$

Onde,

D_c = é a distância característica da fonte para liberações contínuas;

q_0 = é o fluxo volumétrico inicial de gás denso liberado para o ambiente;

u = é a velocidade do vento 10 m acima do ponto de origem da liberação.

O critério de definição para a validade do modelo de gás denso para liberações instantâneas é dado pela seguinte relação (Crowl & Louvar, 2011):

$$\frac{\sqrt{g_0 V_0}}{uD_i} \geq 0,20$$

O critério de definição para a validade do modelo de gás denso para liberações contínuas é dado pela seguinte relação (Crowl & Louvar, 2011):

$$\left(\frac{g_0 q_0}{u^3 D_c}\right)^{1/3} \geq 0,15$$

Uma vez que estes critérios sejam satisfeitos o modelo pode ser utilizado.

É necessário ainda definir se o modelo a ser empregado no cenário é de liberação instantânea ou liberação contínua. Para tal, utiliza-se a seguinte relação:

$$\frac{uR_d}{x}$$

Onde:

u = é a velocidade de deslocamento do vento;

R_d = é o tempo de duração do vazamento;

x = é a distância na direção do vento.

Se a relação apresentar valor maior ou igual a 2,5 adota-se liberação contínua, se o valor for inferior a 0,6 o modelo deve ser de liberação instantânea. Supondo que fique no intervalo entre 0,6 e 2,5 deve-se utilizar ambos e selecionar aquele que apresentar resultados mais conservadores (Crowl & Louvar, 2011).

Na aplicação dos modelos o primeiro passo deve ser a determinação das concentrações na direção do vento a partir dos gráficos apresentados na **Figura 3.10** e **Figura 3.11**.

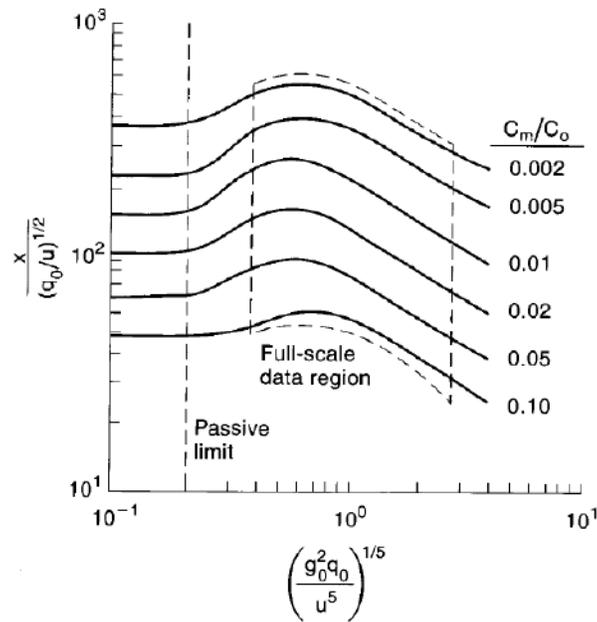


Figura 3.10 – Correlação dimensional para o modelo de Britter-McQuaid para dispersão em pluma (Crowl & Louvar, 2011).

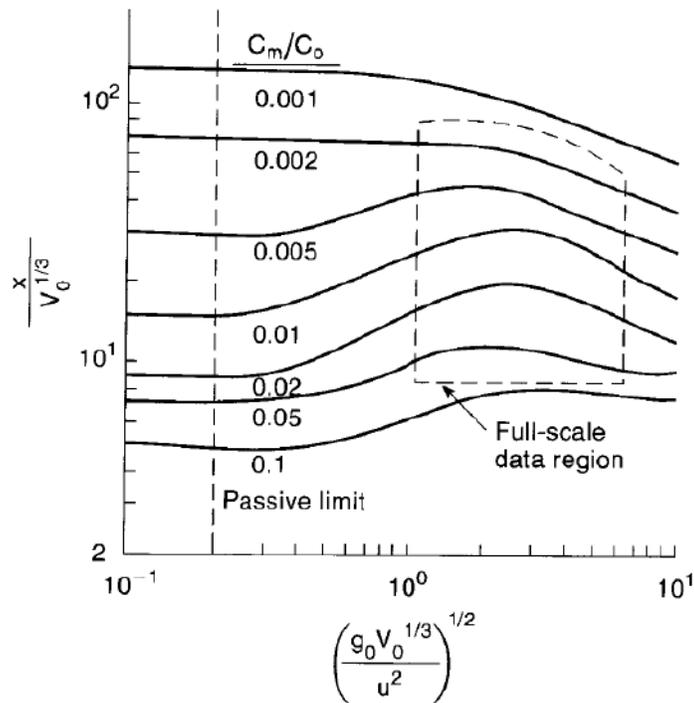


Figura 3.11 – Correlação dimensional para o modelo de Britter-McQuaid para dispersão em *puff* (Crowl & Louvar, 2011).

3.6 Incêndio em poça

Em uma eventual liberação de gás liquefeito, parte do material vazado pode não sofrer flash instantaneamente, permanecendo na forma líquida. Esta fração não vaporizada pode formar uma poça que, sob ocorrência de uma ignição tardia, promoveria um incêndio em poça (TNO, 2005).

De acordo com a norma CETESB P4.261 (CETESB, 2003) o estudo de risco deve estimar o raio equivalente a níveis de radiações térmicas de 12,5 e 37,5 kW/m² a partir da fonte.

A estimativa de radiações térmicas de gases liquefeitos (NIST, 2000) pode ser efetuada em função da taxa de liberação de gás. Para isso utiliza-se a seguinte equação:

$$q'' = \frac{\chi_r Q}{4\pi r^2}$$

Onde,

χ_r = fração radioativa (adimensional)

Q = fluxo de radiação térmica (W)

r = raio afetado pela radiação térmica (m)

q'' = taxa de radiação térmica (W/m²)

Este método assume, essencialmente, que toda a energia térmica é emanada a partir de um determinado ponto. De acordo com NIST (2000) a metodologia preferencial para estimar o fluxo de radiação térmica (Q) para o GNL seria a partir de uma relação direta entre a taxa mássica de queima (m) e o calor de combustão (ΔH_c), conforme apresentado na equação abaixo:

$$Q = m * \Delta H_c$$

Alternativamente, de acordo com a SFPE (1999) pode-se calcular o diâmetro da poça através da seguinte equação:

$$D = 10\sqrt{V}$$

Onde,

D = diâmetro da poça (m)

V = volume da poça (m³)

Esta equação supõe, basicamente, que o diâmetro será proporcional a uma poça de 1 cm de profundidade, isto é, o líquido se espalharia até atingir espessura de 1 cm.

A taxa mássica de queima e o calor de combustão para o GNL e para o GLP estão providos na **Tabela 3.9**:

Tabela 3.9 – Valores de referência de taxa mássica de queima e calor de combustão (NIST, 2000).

Gás	Taxa mássica de queima (kg/m²/s)	Calor de Combustão (kJ/kg)	Taxa de vazamento por área (kW/m²)
H ₂	0,02	120.000	2.000
GNL	0,08	50.000	4.000
GLP	0,1	46.000	4.600

Em posse do diâmetro pode-se estimar a área da poça formada e multiplicá-la pela taxa de vazamento por unidade de área (q_f''), conforme apresentado pela equação a seguir:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} * q_f''$$

Após estimar o fluxo de radiação térmica (Q), e tendo especificado as taxas de radiação térmica conforme a norma CETESB P4.261, necessita-se também obter o parâmetro de fração radiativa (χ_r), para que seja possível, enfim, calcular o raio afetado. Para o GNL, de acordo com NIST (2000), χ_r é de aproximadamente 0,2.

3.7 BLEVE

O BLEVE – *Boiling Liquid expanding vapor explosion* – é considerado um dos acidentes mais perigosos registrados.

Quando materiais inflamáveis ou tóxicos são armazenados sob pressão, este fenômeno pode gerar uma explosão, liberando nuvem de vapor inflamável e/ou

tóxica por uma grande área. A energia liberada pelo processo é capaz de gerar grandes danos a instalações e populações próximas.

O BLEVE é causado por uma falha no recipiente de armazenamento que pode ser causada de diversas maneiras. As formas mais comuns registradas na literatura segundo Crowl & Louvar (2011) são geradas por incêndios, embora a ocorrência de “BLEVE a frio” também seja possível. A sequência natural de ocorrência de um BLEVE a quente é descrita a seguir:

- Um incêndio ocorre nas adjacências do recipiente contendo o fluido.
- O calor gerado provoca o aquecimento das paredes do recipiente.
- Ocorre o aumento da temperatura do líquido em contato com as paredes, que se vaporiza aumentando assim a pressão no interior do tanque.
- Se as chamas atingirem as paredes do tanque onde há somente vapor, ocorrerá um aumento de temperatura local maior do que nas regiões de contato com o líquido, fazendo com que o metal perca força estrutural.
- Com a perda de força estrutural e a elevada pressão no interior do vaso, ocorre a ruptura do tanque de modo explosivo.

Após a ruptura do recipiente, caso o material armazenado seja inflamável, tem-se a formação de uma nuvem de vapor inflamável. Caso esta nuvem encontre uma fonte de ignição, ocorrerá a formação de uma grande “bola de fogo” (ou “cogumelo”).

Em caso de ignição retardada ocorrerá uma explosão de nuvem de vapor (ENV) e, por fim, não havendo ignição ter-se-á liberação tóxica do material.

Neste trabalho será estimado o raio afetado pelo BLEVE através do método do TNT equivalente apresentado no tópico a seguir.

3.7.1 Método do TNT equivalente

O TNT é um explosivo bastante comum e de comportamento bem conhecido. Isto permitiu que detonações de TNT fossem amplamente estudadas pela comunidade científica. O método do “TNT equivalente” baseia-se na relação energética entre uma dada quantidade de combustível (hidrocarboneto) e massa de trinitrotolueno (TNT). Ou seja, a metodologia permite estimar a massa de TNT equivalente que produziria a mesma sobrepressão de explosão causada pela detonação de uma determinada quantidade de combustível. A equação principal deste método é apresentada abaixo (Crowl & Louvar, 2011). Esta relaciona a massa de hidrocarboneto (m) com a massa de TNT equivalente (m_{TNT}).

$$m_{TNT} = \frac{\eta m \Delta H_c}{E_{TNT}}$$

Onde:

m_{TNT} é a massa de TNT (kg);

η é um fator empírico que representa a eficiência explosiva do combustível analisado (adimensional);

m é a massa de hidrocarboneto (kg);

ΔH_c é a energia de explosão do gás inflamável (J/kg);

E_{TNT} é a energia de explosão do TNT (J/kg).

Por simplicidade pode-se utilizar o calor de combustão do gás inflamável, em vez de sua energia de explosão.

A principal incerteza envolvida nesta análise é a determinação do fator empírico de eficiência explosiva. De acordo com Crowl & Louvar (2011), estes valores, comumente, oscilam na faixa de 1 a 10% para os hidrocarbonetos de uso mais comum.

A sobrepressão escalar (p_s) aplicada no gráfico da figura 3.12 é adimensional. A relação abaixo permite obter seu valor em unidade de pressão (kPa).

$$p_s = \frac{p_0}{p_a}$$

Onde:

p_s é a sobrepressão escalar (adimensional);

p_0 é a sobrepressão gerada (kPa);

p_a é a pressão ambiente (kPa).

A partir da **Tabela 3.10** é possível determinar os danos e consequências em função da sobrepressão gerada.

Tabela 3.10 – Danos causados devido a sobrepressão (Crowl & Louvar, 2011 – adaptado).

Pressão (kPa)	Danos
0,14	Ruído perturbador (137 dB, 10-15 Hz)
0,21	Fratura de grandes janelas que já estejam sob tensão
0,28	Ruído alto (143 dB), ruído sônico, falhas em vidros
0,69	Quebra de pequenas janelas que já estejam sob tensão
1,03	Pressão típica de fratura de vidro
2,07	Distância segura (95% de chance de não haver danos sérios abaixo deste valor).
2,76	Danos estruturais pequenos e limitados
3,4-6,9	Janelas partem-se ao meio; danos ocasionais às estruturas das janelas
4,8	Danos estruturais pequenos às casas
6,9	Demolição parcial de casas tornando-as inabitáveis
6,9-13,8	Enrugamento de alumínio e aço
9	Estruturas de aço de edifícios revestidos é levemente afetada
13,8	Colapso parcial de telhados e paredes das casas
13,8-20,7	Paredes de blocos de concreto quebram-se
15,8	Limite inferior de danos estruturais severos
17,2	Destrução de 50% da estrutura de tijolos da casa
20,7	Máquinas pesadas (3000 lb) sofrem danos pequenos. Edifícios com estrutura de aço se desligam de suas fundações.
20,7-27,6	Edifícios sem estrutura de aço de sustentação são demolidos
27,6	Ruptura da estrutura externa de edifícios industriais
34,5-48,2	Destrução quase que completa das casas
48,2	Vagões carregados de trens tombam
62	Vagões carregados de trens destruídos
68,9	Destrução total de edifícios
2068	Limite de cratera

De acordo com a norma CETESB P4.261 (CETESB, 2003), para os casos de sobrepressões decorrentes de explosões deverão ser adotados os valores de 0,1 e 0,3 bar, referentes as consequências que ameaçam a vida humana. O primeiro corresponde à probabilidade de 1% de fatalidades e o segundo de 50%. Esta metodologia visa calcular o raio afetado pela explosão.

Uma vez conhecida a sobrepressão escalar a ser avaliada, pode-se estimar a distância escalar (Z_e), através da correlação apresentada pelo gráfico da **Figura 3.12**.

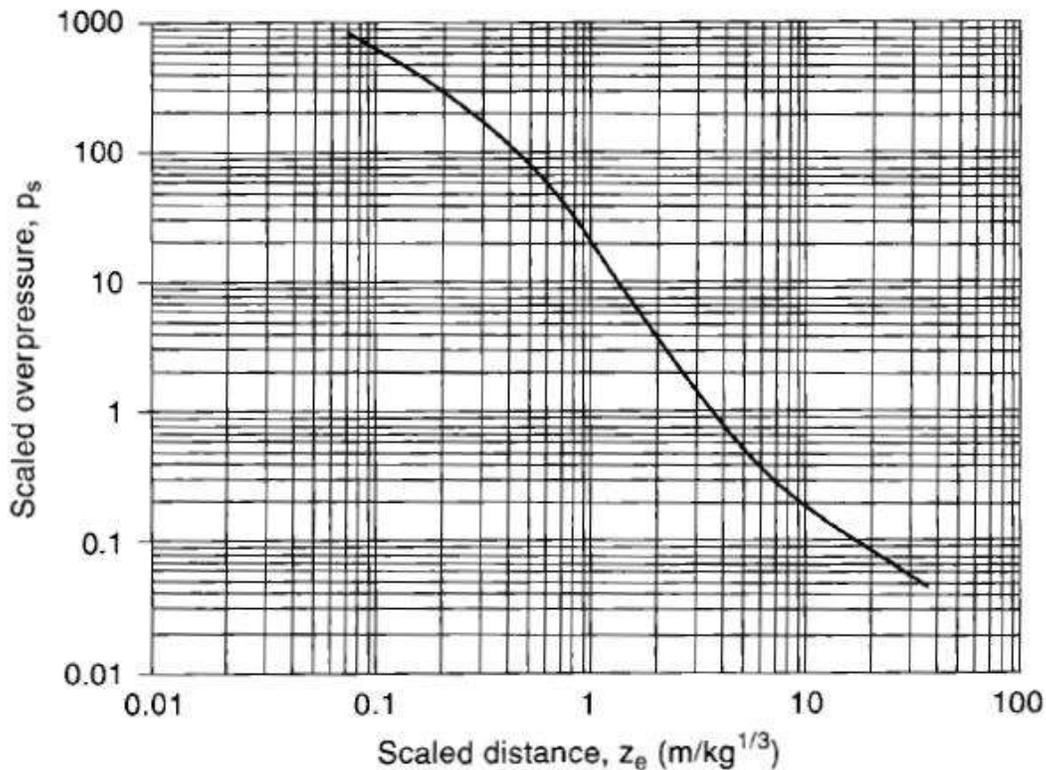


Figura 3.12 – Relação entre a sobrepressão escalar (eixo vertical) e a distância escalar (eixo horizontal) para explosões (Crowl & Louvar, 2011).

Sendo a massa de hidrocarboneto previamente conhecida, e por consequência a massa de TNT equivalente (em quilos), pode-se estimar o raio (em metros) afetado pela sobrepressão que está sendo avaliada. Para tanto emprega-se a relação abaixo (Crowl & Louvar, 2011).

$$Z_e = \frac{r}{m_{TNT}^{1/3}}$$

Onde:

Z_e é a distância escalar ($m/kg^{1/3}$);

r é a distância do ponto de origem da explosão (m);

m_{TNT} é a massa de TNT equivalente determinada (kg).

4. Riscos Associados ao GNL

Conforme citado anteriormente, o Gás Natural Liquefeito (GNL) é obtido a partir do Gás Natural (GN), quando este é resfriado a temperaturas inferiores a -160°C , a pressão atmosférica (ANP, 2010). Deste modo, o GNL é produzido através de um processo criogênico, e não a partir de um processo sob elevadas pressões – tal qual o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP).

Embora liquefeito a partir de um princípio distinto do GLP, o GNL quando liberado para o ambiente se comporta de forma bastante semelhante: sofrendo imediata mudança de fase e retornando para a fase gás. Desse modo, em cenários que envolvam liberação do material liquefeito para o meio ambiente, são formadas grandes quantidades de vapores inflamáveis à medida que o composto liquefeito retorna à fase gasosa. A formação de nuvem inflamável é ponto importante na análise dos riscos, uma vez que pode promover a criação de uma atmosfera explosiva.

É importante ressaltar que atmosferas explosivas estão relacionadas diretamente ao conceito do tetraedro do fogo, apresentado na **Figura 4.1**. Segundo este conceito são necessários quatro elementos para a existência do fogo: o combustível, o comburente (geralmente o oxigênio), uma fonte de calor ou ignição, e uma reação em cadeia que propague a chama (CIEB, 2008).

Combustível é toda substância que queima, podendo ser sólido, líquido ou gás, sendo que combustíveis sólidos e líquidos devem primeiro passar ao estado gasoso para posteriormente inflamar. A chama é um fenômeno que ocorre apenas na fase gás (CIEB, 2008).

Comburente é o elemento que se combina com os vapores dos combustíveis, possibilitando a queima. Na ausência de comburente a combustão não é possível. O oxigênio é o principal comburente encontrado na natureza. Outro composto que também tem essa propriedade é o cloro, que em contato com a amônia e metais pulverizados pode gerar incêndios (CIEB, 2008).

Fontes de calor ou ignição podem ser naturais ou artificiais. As fontes naturais são provenientes da luz do sol, fenômenos químicos ou meteorológicos. Já as fontes de calor não naturais estão relacionadas a processos físicos, tais como operações de solda, corte, aquecimento, etc.

Finalmente, a cadeia de reações formada durante a combustão gera produtos intermediários instáveis, denominados radicais livres. Através de uma complexa rede de reações o combustível é levado a gás carbônico e água na queima completa, ou a diversos compostos quando existem restrições na quantidade de oxigênio – cenário mais comum na prática. A **Figura 4.1** ilustra o tetraedro do fogo.



Figura 4.1 – Tetraedro do Fogo (ABNT, 2008)

Para gerar uma atmosfera inflamável é necessário que as concentrações de combustível e comburente estejam em proporção adequada. Essa faixa denomina-se “zona de inflamabilidade”. Apenas misturas dentro da zona de inflamabilidade podem sofrer ignição.

Segundo Crowl & Louvar (2011), o Limite Inferior de Inflamabilidade (LII) consiste na “*mínima concentração de gás capaz de provocar a combustão do produto, a partir do contato com uma fonte de ignição*”. Sendo assim, concentrações menores possuem excesso de oxigênio e pouca quantidade de produto inflamável. Já o Limite Superior de Inflamabilidade (LSI) é a “*máxima concentração de gás para que a combustão ocorra*”. Neste caso, em concentrações acima do LSI existe grande concentração de produto, porém pouco oxigênio para realizar sua combustão. O GNL possui valores de LII e LSI muito próximos, o que resulta em uma faixa de inflamabilidade estreita, como demonstrado na **Figura 4.2**.

Conforme mencionado, o componente principal do GNL é o metano, um gás inodoro, incolor e que tem ponto normal de vaporização de -161°C . O vapor de metano se dissipa rapidamente na atmosfera por ser menos denso que o ar à temperatura ambiente. Entretanto, após um vazamento de GNL, a baixa temperatura faz com que este gás se torne mais denso que o ar, propiciando assim sua concentração próxima ao chão, tendendo a entrar em valas e desníveis.

Tal fato pode gerar nuvens de vapor de GNL próximas ao solo com concentrações dentro da zona de inflamabilidade. Explosões no interior de valas e canaletas também podem ocorrer.

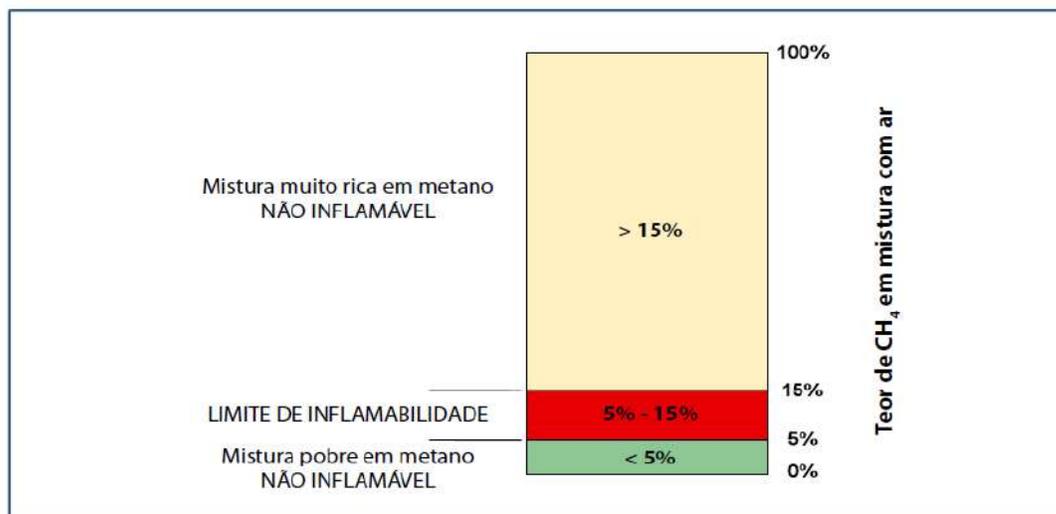


Figura 4.2 – Faixa de Inflamabilidade do GNL (FOSS, 2007)

O interior dos tanques de armazenamento de gás em geral apresenta elevada concentração do combustível, muito superior aos LSI. Porém, em cenários de vazamento de GNL ou de esvaziamento dos tanques permitindo entrada de ar ambiente, os vapores do combustível se misturam com o oxigênio do ar, podendo dar origem a misturas potencialmente inflamáveis.

Em ambientes abertos ou mesmo espaços confinados dotados de ventilação adequada, os vapores combustíveis rapidamente se dispersam no meio, reduzindo a concentração para valores abaixo do LII.

Pode-se concluir assim que a maior possibilidade de ignição está em ambientes confinados ou mal ventilados, interiores de tanques operados de forma indevida ou proximidades de pontos de vazamento.

É importante ressaltar que os riscos associados ao GNL decorrem não apenas dos vapores inflamáveis, mas também da baixa temperatura associada e da possibilidade de asfixia, assim como outros possíveis cenários.

4.1 Histórico de Incidentes com GNL

A indústria do GNL possui um histórico de acidentes reduzido quando comparada com demais setores, como o petroquímico. Os principais acidentes relatados ocorreram por conta de falhas mecânicas, como em sistemas de refrigeração, válvulas, construções com material inadequado, ou por falhas humanas.

Os principais acidentes mundiais relatados, segundo ANP (2010), estão enumerados abaixo:

a) Cleveland, Ohio, EUA, 1944

Este acidente ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial, em uma instalação de armazenamento de GNL da East Ohio Gas Company, construída em 1941.

Devido aos esforços de guerra, houve falta de ligas de aço com alto teor de níquel, material adequado para a fabricação de peças e instalações para operação em baixas temperaturas. O aço utilizado para esta operação, que normalmente continha cerca de 9% de níquel, passou a conter apenas 4%. Sendo assim, o material passou a não apresentar mais as características adequadas para o trabalho, ocasionando vazamento de GNL com posterior propagação de nuvem de gás pelas ruas e penetração na rede de água pluvial. O gás confinado sofreu ignição e matou 128 pessoas na área residencial próxima a planta. O cenário da região posterior ao acidente é mostrado na **Figura 4.3**.



Figura 4.3 – Destroços nas proximidades do tanque de gás liquefeito, em Cleveland, 1944 (NFPA, 2008).

b) La Spezia, Ligúria, Itália, 1971

Este evento foi o primeiro a documentar o caso de *rollover* em uma planta de GNL. O incidente ocorreu após a descarga de um navio metaneiro, que esteve fundeado por cerca de um mês. Após algumas horas de descarga, o tanque de GNL do terminal sofreu um aumento de pressão, o que causou o vazamento de gás pelas válvulas de segurança por algumas horas. Atribuiu-se esse acidente à estratificação de GNL no tanque de armazenamento do terminal que provocou a movimentação repentina do conteúdo causando assim o aumento de pressão. Este acidente serviu de base para a elaboração de procedimentos de enchimento de tanques de acordo com as diferenças de temperatura e densidade entre o GNL armazenado no tanque e aquele da corrente sendo alimentada.

c) Arzew, Argélia, 1977

A ruptura de uma válvula, localizada no topo de um tanque de estocagem, provocou vazamento de GNL pressurizado matando um trabalhador por congelamento. Cerca de 2.000 m³ de GNL foram liberados para atmosfera, entretanto, como o gás foi rapidamente dissipado, acabou não sofrendo ignição, evitando assim maiores danos. Após investigação, constatou-se que o problema estava no material da válvula, alumínio, e não aço inox como recomendado.

d) Cove Point, Maryland, EUA, 1979

Este acidente ocorreu devido a um vazamento de GNL pelo selo de uma das bombas do Terminal de Importação Columbia Gas LNG Terminal. A nuvem de gás penetrou por um eletroduto e atingiu a subestação do terminal, causando explosão provocando a morte de um operário.

e) Skikda, Argélia, 2004

A partir de um vazamento do fluido refrigerante da unidade de liquefação de gás natural, o hidrocarboneto liberado formou uma nuvem que penetrou na caldeira da unidade, aumentando a quantidade de combustível para queima. Esta elevação do volume de combustível provocou aumento na quantidade de calor liberado que por sua vez aumentou a pressão do sistema que excedeu a capacidade da válvula de segurança e levou ao rompimento da caldeira. Esta instalação estava próxima o suficiente da área de vazamento e provocou a ignição da nuvem de vapor, matando 27 pessoas e ferindo 72. A **Figura 4.4** mostra o incêndio provocado pela nuvem de vapor após sua ignição.



Figura 4.4 – Acidente de GNL na Argélia 2004 (ANP, 2010).

5. Estudo de Caso

5.1 Apresentação

Neste estudo foi realizada análise de riscos de uma unidade regaseificadora de GNL existente na Baía de Guanabara, avaliando os perigos mais relevantes e propondo medidas corretivas e mitigadoras.

A **Figura 5.1** apresenta a imagem em que consta a localidade onde está instalada a unidade (assinalada por uma seta verde). Suas coordenadas geográficas são: 22°46'53,3" S e 43°7'55,1" W.

O terminal de regaseificação foi instalado nesta região porque esta está equidistante dos principais postos de recolhimento de petróleo instalados na Baía de Guanabara, minimizando assim o risco de uma reação em cadeia em caso de acidentes. O GN regaseificado por esta estação é transportado através de gasodutos submersos e terrestres, totalizando aproximadamente 20 km de tubulação até a estação da REDUC, onde é distribuído para a região (ABS Consulting, 2007)..

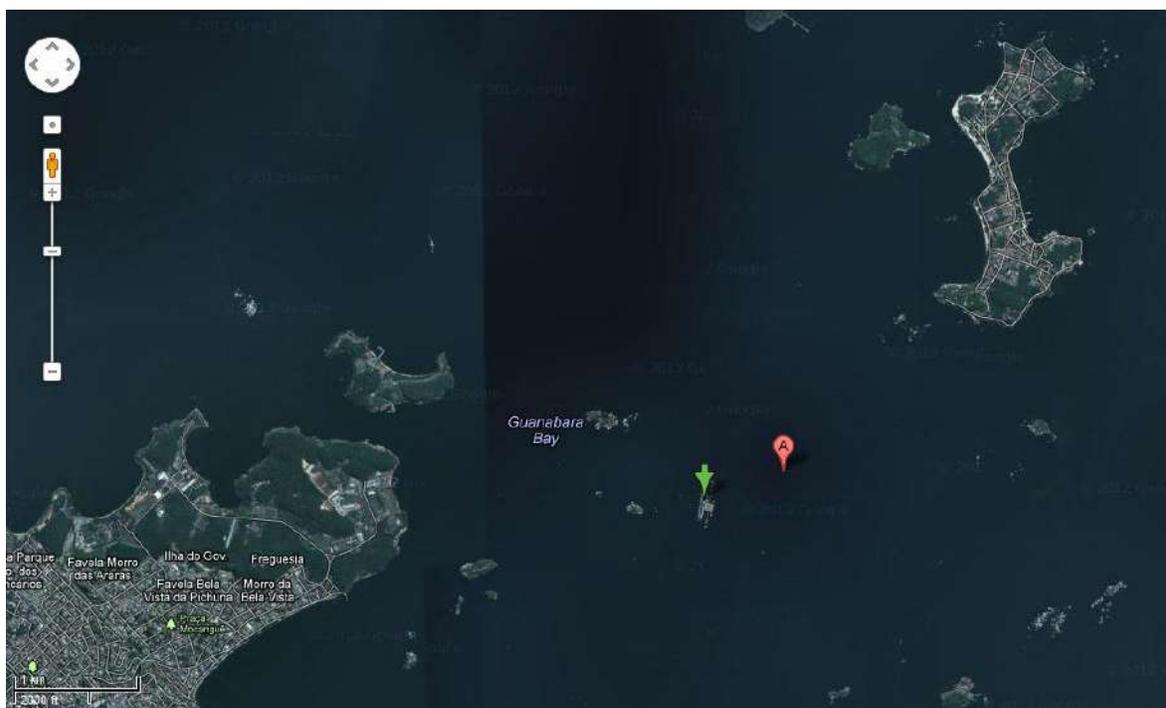


Figura 5.1 – Mapa de localização da unidade de regaseificação de GNL estudada (Google Maps, 2012).

Como pode ser verificado, a unidade é situada em uma região vicinal à área urbana da Ilha do Governador (a Oeste) e à Ilha de Paquetá (a Nordeste). A análise de riscos realizada visou avaliar a segurança de operação da unidade, bem como definir a área que seria potencialmente afetada por em eventual incidente.

A unidade regaseificadora avaliada neste trabalho é, na realidade, um navio regaseificador (Golar Winter), que foi fretado para permanecer na Baía de Guanabara em virtude da atividade fim. Sua capacidade de armazenamento é de 138.000 m³ de GNL, o equivalente a aproximadamente 82,8 milhões m³ de gás em condições ambientais de temperatura e pressão (ANP, 2010). A planta de regaseificação deste navio tem capacidade de gerar 14 milhões de metros cúbicos de gás natural por dia (ANP, 2010). A **Figura 5.2** apresenta a imagem que ilustra o navio em questão.

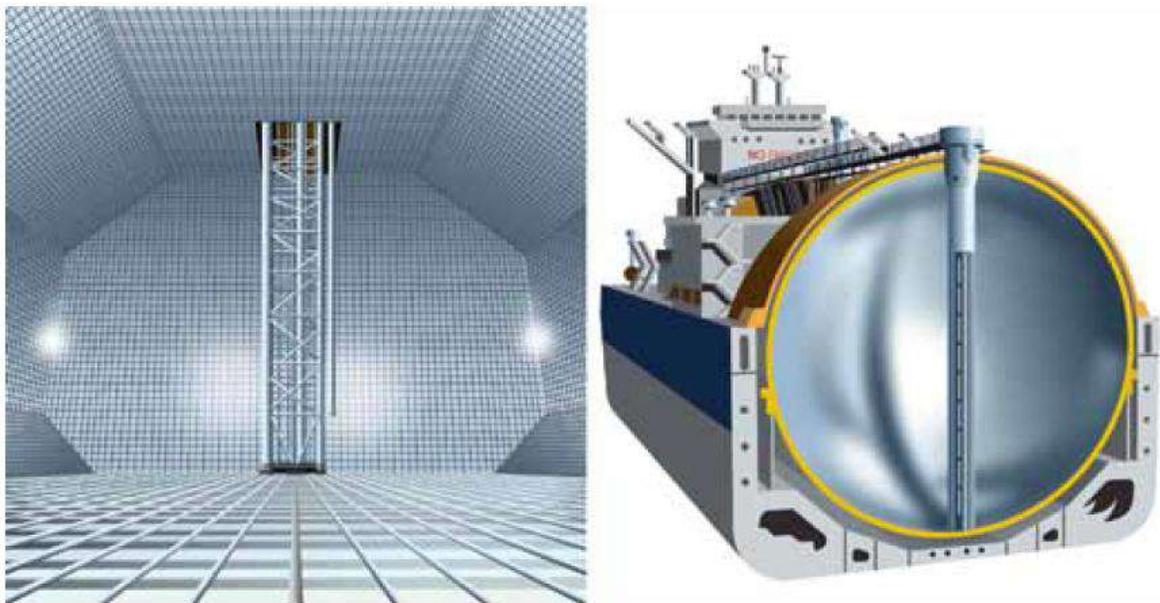


Figura 5.2 – Área interna de armazenamento de GNL do navio GolarWinter (ANP, 2010).

Para os fins deste estudo, levou-se em consideração cenários de possíveis vazamentos e acidentes envolvendo o navio e suas linhas.

5.2 Análise Preliminar de Risco (APR) e Matriz de Risco

Com o objetivo de estimar os riscos relativos à unidade de regaseificação de GNL, foi feita uma Análise Preliminar de Riscos (APR), em que foram identificados os

cenários hipotéticos mais relevantes. A classificação das categorias de severidade e frequência estão descritas nas **tabelas 3.2 e 3.3**.

De acordo com a norma CONAMA 398/08 um vazamento é classificado como grande quando maior que 200 m³, e é classificado como pequeno quando for inferior a 8 m³. Para valores intermediários entre 8 e 200 o vazamento é considerado médio (CONAMA, 2008).

A **Tabela 5.1** apresenta a planilha da APR resultados do estudo realizado.

Tabela 5.1 – Resultados da Análise Preliminar de Risco (APR) da unidade regaseificadora de GNL.

Análise Preliminar de Riscos									
Unidade de Regaseificação de GNL - Baía de Guanabara RJ									
Evento	Causas	Modos de Detecção	Efeitos	Cat. Freq.	Cat. Severidade	Cat. Risco	Recomendações/ Observações	Hipótese Acidental	
Pequena Liberação de GNL	Furo em tanque de estocagem	- Visual - Sensores de nível e de material inflamável	Liberação de Componente Asfixiante	B	II	Desprezível	Inspeção periódica dos equipamentos, procedimentos operacionais, check-list de manutenção preventiva e procedimentos	1	
	Falha em válvula de segurança	- Visual - Sensores de fluxo e de material inflamável	Liberação de Componente Asfixiante	A	I	Desprezível		Ativação do Plano de Emergência da unidade.	2
	Furo em dutos	- Visual - Sensores de fluxo e de material inflamável	Liberação de Componente Asfixiante	A	I	Desprezível			3
	Furo em tanque de estocagem	- Visual - Sensores de nível e de material inflamável	Possibilidade de incêndio em poça em presença de fonte de ignição	A	II	Desprezível	Inspeção periódica dos equipamentos, procedimentos operacionais, check-list de manutenção preventiva e procedimentos	4	
	Falha em válvula de segurança	- Visual - Sensores de fluxo e de material inflamável	Possibilidade de incêndio em poça em presença de fonte de ignição	A	I	Desprezível		Ativação do Plano de Emergência da unidade.	5
	Furo em dutos	- Visual - Sensores de fluxo e de material inflamável	Possibilidade de incêndio em poça em presença de fonte de ignição	A	I	Desprezível			Possuir uma brigada de incêndio treinada para possíveis emergências.

Análise Preliminar de Riscos								
Unidade de Regaseificação de GNL - Baía de Guanabara RJ								
Evento	Causas	Modos de Detecção	Efeitos	Cat. Freq.	Cat. Severidade	Cat. Risco	Recomendações/ Observações	Hipótese Acidental
Grande Liberação de GNL	Ruptura em tanque de estocagem	- Visual - Sensores de nível e de material inflamável	Liberação de Componente Asfixiante	A	IV	Menor	Inspeção periódica dos equipamentos, procedimentos operacionais, check-list de manutenção preventiva e procedimentos	7
	Falha em válvula de segurança	- Visual - Sensores de fluxo e de material inflamável	Liberação de Componente Asfixiante	A	I	Desprezível	Ativação do Plano de Emergência da unidade.	8
	Furo em dutos	- Visual - Sensores de fluxo e de material inflamável	Liberação de Componente Asfixiante	A	I	Desprezível	Utilização de Máscaras de Pressão Positiva	9
	Ruptura em tanque de estocagem	- Visual - Sensores de nível e de material inflamável	Possibilidade de incêndio em poça em presença de fonte de ignição	A	IV	Menor	Inspeção periódica dos equipamentos, procedimentos operacionais, check-list de manutenção preventiva e procedimentos	10
	Falha em válvula de segurança	- Visual - Sensores de fluxo e de material inflamável	Possibilidade de incêndio em poça em presença de fonte de ignição	A	I	Desprezível	Ativação do Plano de Emergência da unidade.	11
	Furo em dutos	- Visual - Sensores de fluxo e de material inflamável	Possibilidade de incêndio em poça em presença de fonte de ignição	A	I	Desprezível	Possuir uma brigada de incêndio treinada para possíveis emergências.	12

Análise Preliminar de Riscos								
Unidade de Regaseificação de GNL - Baía de Guanabara RJ								
Evento	Causas	Modos de Detecção	Efeitos	Cat. Freq.	Cat. Severidade	Cat. Risco	Recomendações/ Observações	Hipótese Acidental
Grande Liberação de GNL	Ruptura em tanque de estocagem	- Visual - Sensores de nível e de material inflamável	Possibilidade de Incêndio em Nuvem	A	IV	Menor	Inspeção periódica dos equipamentos, procedimentos operacionais, check-list de manutenção preventiva e procedimentos	13
	Falha em válvula de segurança	- Visual - Sensores de fluxo e de material inflamável	Possibilidade de Incêndio em Nuvem	A	I	Desprezível	Ativação do Plano de Emergência da unidade.	14
	Furo em dutos	- Visual - Sensores de fluxo e de material inflamável	Possibilidade de Incêndio em Nuvem	A	I	Desprezível	Possuir uma brigada de incêndio treinada para possíveis emergências.	15
	Ruptura em tanque de estocagem permitindo a entrada de ar contendo vapor d'água, que condensa devido a baixa temperatura no interior do tanque. A água ao entrar em contato com o GNL pressuriza o tanque por RPT.	- Visual - Sensores de nível e de material inflamável	Possibilidade de ocorrência de BLEVE	A	IV	Menor	Inspeção periódica dos equipamentos, procedimentos operacionais, check-list de manutenção preventiva e procedimentos. Ativação do Plano de Emergência da unidade.	16

A partir da APR realizada foi possível construir a Matriz de Risco para a unidade regaseificadora de GNL em estudo, conforme apresentado na **Figura 5.3**:

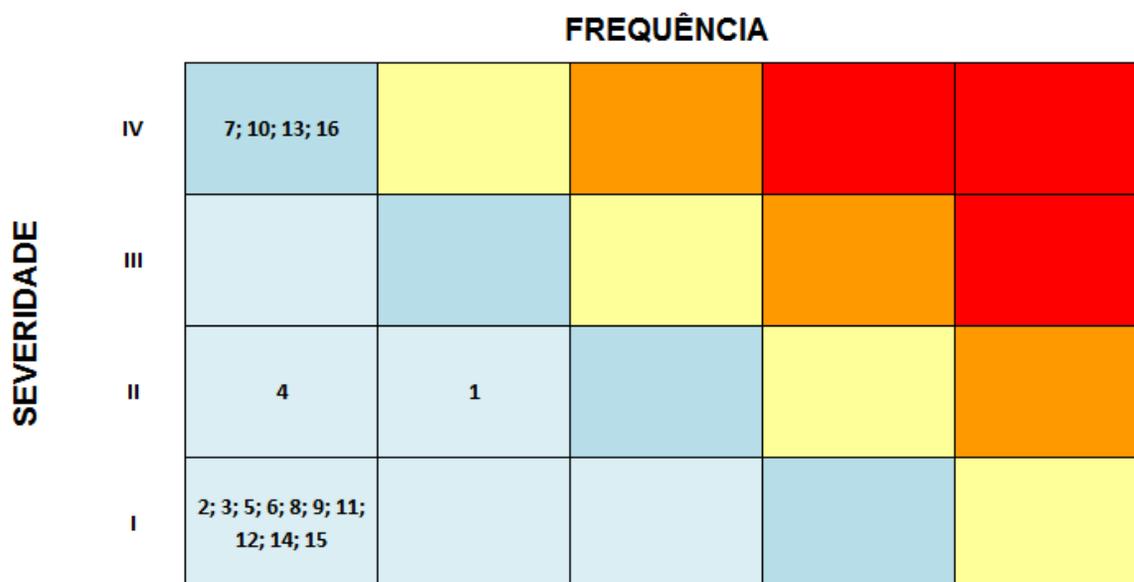


Figura 5.3 – Matriz de risco obtida a partir da Análise Preliminar de Risco (APR).

Como pode ser verificado, não há cenários situados nas zonas amarelas, laranja e vermelha, que são as regiões indicativas de riscos mais relevantes, e que poderiam vir a exigir reavaliação de modo a mitigá-los e minimizá-los.

A não existência de riscos em zonas relevantes deve-se às características de severidade e frequência apresentadas no capítulo 3. De acordo com a literatura encontrada, todas as frequências inferiores a 10^{-4} são consideradas extremamente remotas, dificultando assim uma distribuição que concentrasse os eventos na parte mediana da matriz de risco.

5.3 Árvore de Eventos e cálculo das probabilidades dos eventos

Para a estimativa frequencial das consequências utilizou-se a Árvore de Eventos, que apresenta de maneira sequencial as probabilidades de cada etapa constituinte do incidente.

A partir dos resultados apresentados no APR, foram levantadas hipóteses acidentais principais, oriundas de grandes vazamentos de GNL e de pequenos vazamentos. Os seguintes cenários foram então considerados:

- grande liberação de GNL por: “ruptura de tanque” ou “falha em válvula” ou “ruptura de duto”.
- pequena liberação de GNL por: “furo em tanque” ou “falha em válvula” ou “falha em duto”.

Para a construção das Árvores de Eventos obteve-se na literatura informações acerca das probabilidades para a ocorrência de cada evento individualmente.

A **Tabela 5.2** e a **Tabela 5.3**, a seguir, apresentam estas probabilidades:

Tabela 5.2 – Frequência de falha para tubulações (TNO, 2005).

Fonte	Ruptura	Vazamento
Tubo D < 75 mm	$1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}\text{ano}^{-1}$	$5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}\text{ano}^{-1}$
Tubo 75 < D < 150 mm	$3 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}\text{ano}^{-1}$	$2 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}\text{ano}^{-1}$
Tubo D > 150 mm	$1 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}\text{ano}^{-1}$	$5 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}\text{ano}^{-1}$

Tabela 5.3 – Frequência de falha para tanques e válvulas (TNO, 2005).

Cenário	Frequência de falha
Ruptura em tanque	$5 \times 10^{-6}\text{ano}^{-1}$
Furo em tanque	$1 \times 10^{-4}\text{ano}^{-1}$
Falha em válvula	$1 \times 10^{-5}\text{ano}^{-1}$

De acordo com TNO (2005), a probabilidade para ignição imediata do metano é de 2%, enquanto que a probabilidade de ignição retardada em um navio de transporte de substâncias inflamáveis é de 30%.

Com base nas probabilidades levantadas, foram elaborados fluxogramas na forma de Árvore de Eventos. Esta metodologia permitiu estimar as respectivas frequências de cada caso levantado. As **Figuras 5.4 a 5.9** representam os resultados obtidos.

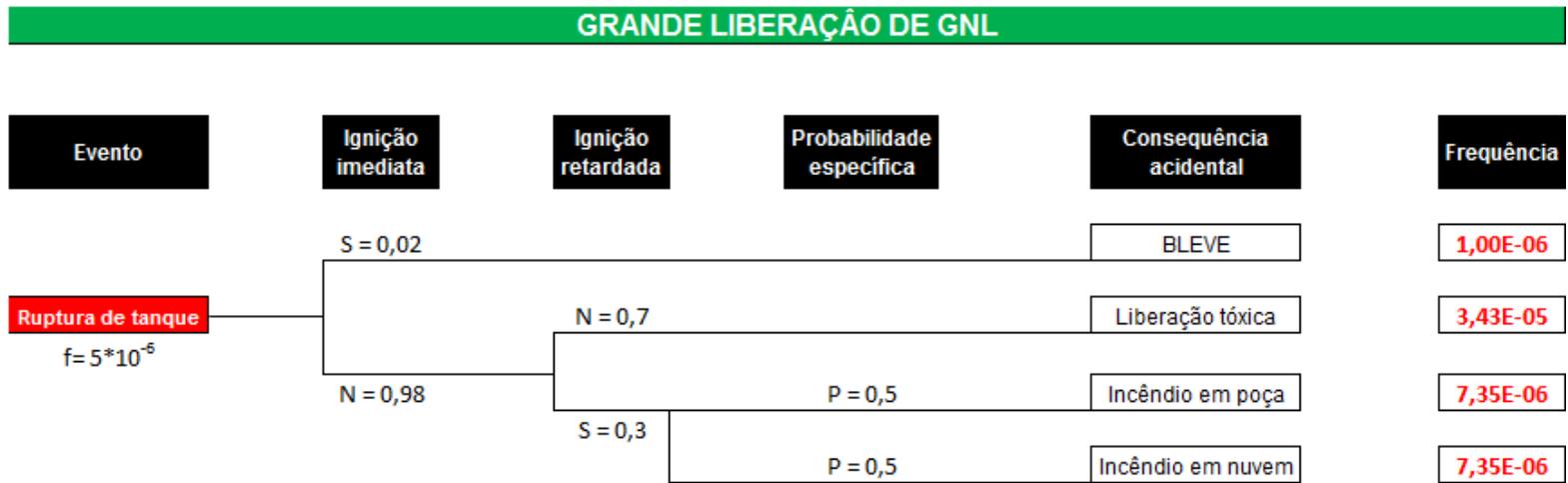


Figura 5.4 – Árvore de Eventos para o caso de ruptura de tanque com grande liberação de GNL.

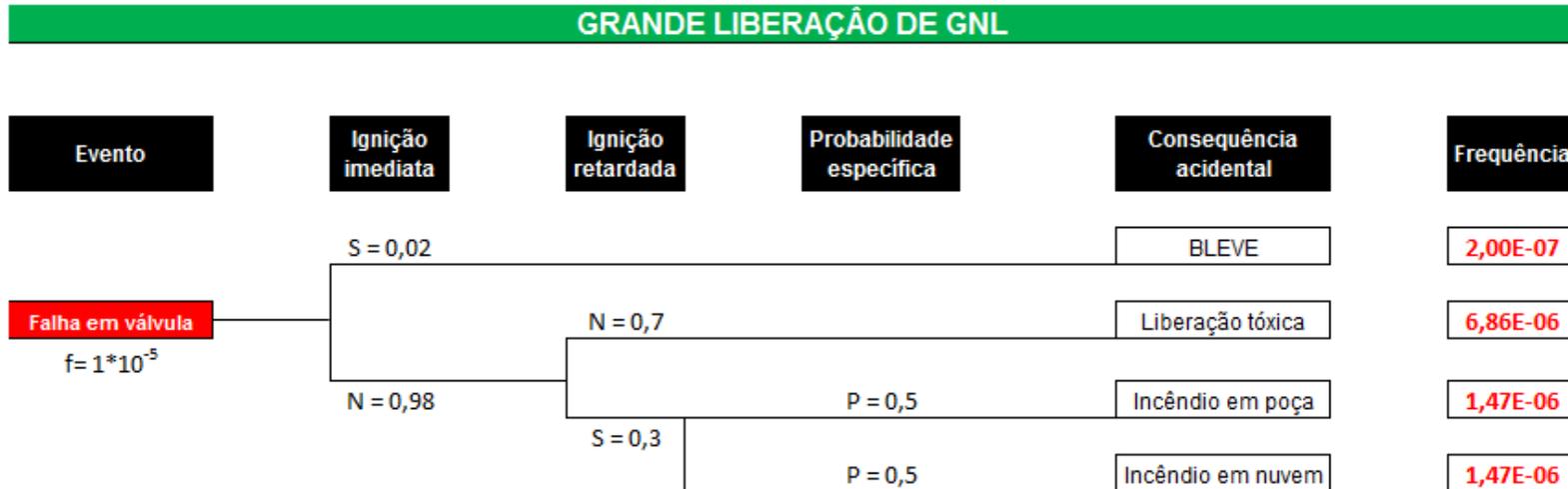


Figura 5.5 – Árvore de Eventos para o caso de falha em válvula com grande liberação de GNL.

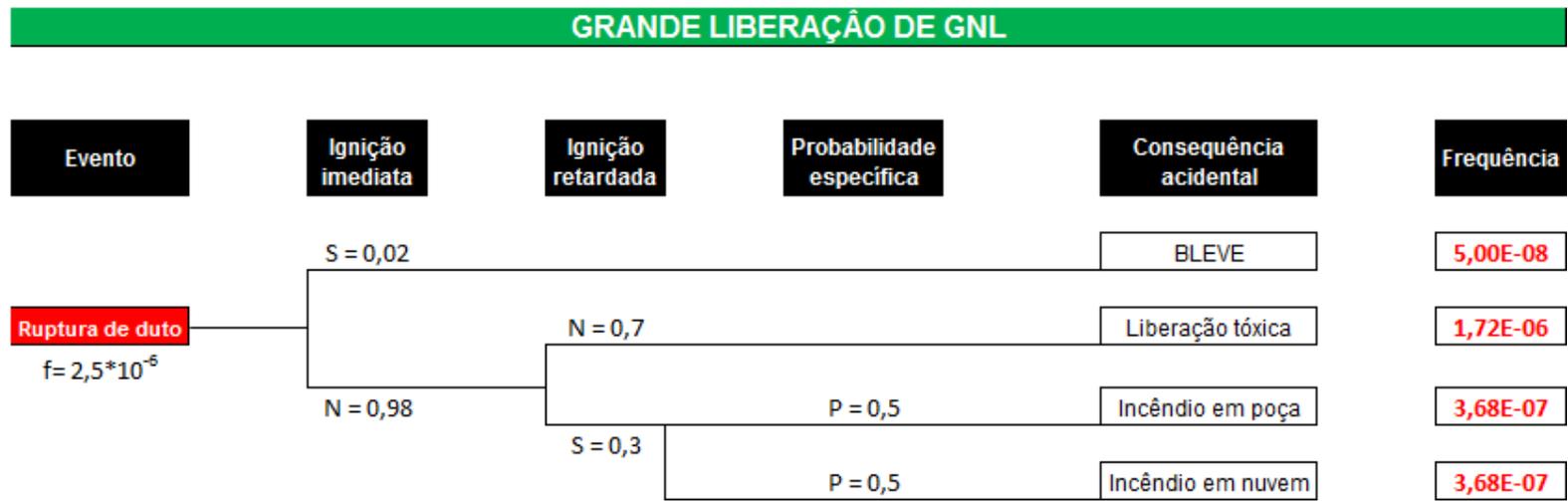


Figura 5.6 – Árvore de Eventos para o caso de ruptura de duto com grande liberação de GNL.

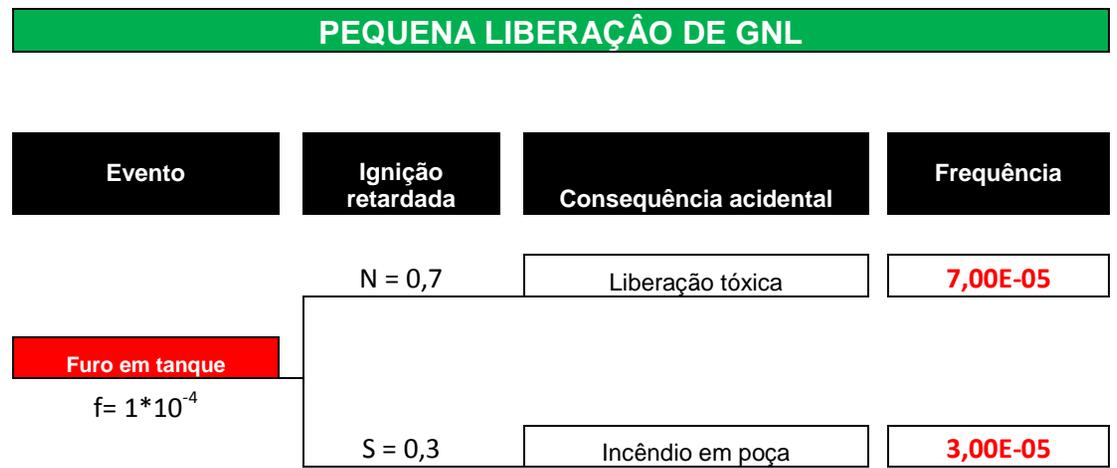


Figura 5.7 – Árvore de Eventos para o caso de furo de tanque com pequena liberação de GNL.

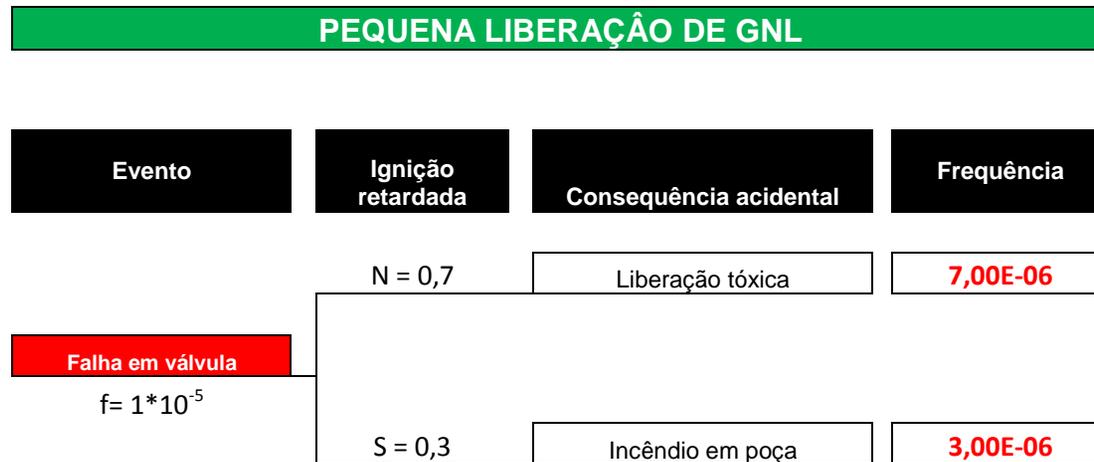


Figura 5.8 – Árvore de Eventos para o caso de falha em válvula com pequena liberação de GNL.

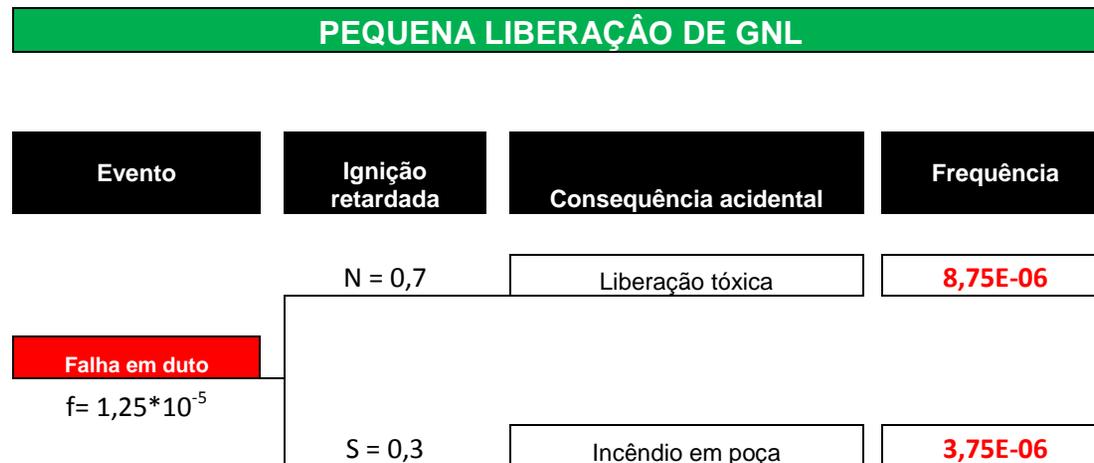


Figura 5.9 – Árvore de Eventos para o caso de falha em duto com pequena liberação de GNL.

Para a confecção destas Árvores de Eventos foram adotados dois grupos cenários base: pequena ou grande liberação de GNL. Em seguida, cada árvore foi classificada em função de seu evento iniciador. Como pode ser verificado em cada uma das figuras, cada evento iniciador apresenta uma frequência associada.

A título de demonstração da metodologia, na **Figura 5.4** foi avaliado um cenário de grande liberação de GNL resultante de ruptura súbita do tanque de armazenamento do navio. Como se pode verificar na **Tabela 5.3**, a frequência atrelada a tal incidente é de $5 \cdot 10^{-6}$ por ano. De modo a obter uma estimativa dos possíveis cenários acidentais levantados – BLEVE, liberação tóxica, incêndio em poça e incêndio em nuvem – foi realizada análise em função da probabilidade de ocorrência de ignição instantânea. De acordo com TNO (2005), esta probabilidade é de 2% para o caso do GNL e resultaria em uma BLEVE. Portanto, a não ocorrência de ignição imediata é de 98%. Seguindo a árvore, verificou-se a probabilidade de ocorrência de ignição retardada do GNL; também de acordo com TNO (2005) esta probabilidade é de 30%. Logo, a probabilidade de não ocorrência de ignição retardada é de 70%, o que caracterizou na **Figura 5.4** o incidente de liberação tóxica.

De acordo com TNO (2005), supondo que haja ignição retardada, a probabilidade de ocorrência de um incêndio em poça e de uma nuvem inflamável são equivalentes, isto é, cada uma possui probabilidade de 50% de ocorrência.

Enfim, para o cálculo das probabilidades finais, foi feito o produto das probabilidades de ocorrência conjunta de cada linha da Árvore de Eventos.

O mesmo procedimento foi realizado na **Figura 5.5** e na **Figura 5.6**.

Para as demais Árvores de Eventos, representadas pelas **Figuras 5.7 a 5.9**, houve pequena diferença devido às suas consequências menos severas. Por se tratar de um evento de pequena liberação de GNL, as concentrações do mesmo no ar são muito baixas, o que impossibilita que este atinja seu limite de inflamabilidade inferior. Deste modo, nestes casos não ocorre ignição imediata. Contudo, com o acúmulo de gás, é possível que ocorra eventual incêndio em poça, resultado de ignição retardada. O cálculo das probabilidades é análogo ao apresentado anteriormente, seguindo o mesmo princípio de multiplicação de cada uma das linhas das Árvores de Eventos.

5.4 Transição rápida de fases (RPT – *Rapid Phase Transition*)

O GNL, conforme citado, é armazenado em temperatura de -162°C . Em um vazamento, ao ser submetido a condições ambientais (temperatura e pressão), sofre um processo de expansão súbita, devido à transição do estado líquido para o estado gasoso.

O GNL pode sofrer um fenômeno particular chamado de Transição Rápida de Fases – em inglês *Rapid Phase Transition (RPT)* – que ocorre quando tem-se aquecimento rápido um líquido, ou quando é feita uma rápida despressurização deste. Como resultado tem-se um fluido metaestável a pressão ambiente. Este fenômeno ocorre normalmente quando um líquido volátil entra em contato com outro em temperatura mais elevada, levando, no caso em estudo, a um aumento súbito de pressão local no tanque de armazenamento de GNL (Cleaver *et. al*, 1998).

A rápida transição de fases é um fenômeno meramente físico e não conduz a ignição do líquido. Ocorre apenas a elevação da pressão no vaso (Cleaver *et. al*, 1998).

Em aquecimentos ou em despressurizações ultrarrápidos, ocorre mudança de fase no fluido. As relações de equilíbrio termodinâmico podem ser determinadas por equações de estado, mas também podem ser explicadas a partir do limite termodinâmico de estabilidade (Cleaver *et. al*, 1998).

A transição termodinâmica é representada graficamente na **Figura 5.10**.

Como pode ser constatado a partir do gráfico, seguindo a linha pontilhada azul, o metano inicialmente armazenado a temperatura de $111,6\text{ K} (-162^{\circ}\text{C})$ a 1 bar é rapidamente aquecido a $171,4\text{ K}$. Neste instante, cruza a linha contínua vermelha, atingindo, portanto, seu limite termodinâmico de estabilidade. Novamente, seguindo a linha pontilhada azul até que esta cruze a curva de pressão de vapor, verifica-se que ocorre um aumento súbito de pressão para $24,6\text{ bar}$. Esta expansão realiza trabalho de módulo igual a $56,2\text{ kJ/mol}$.

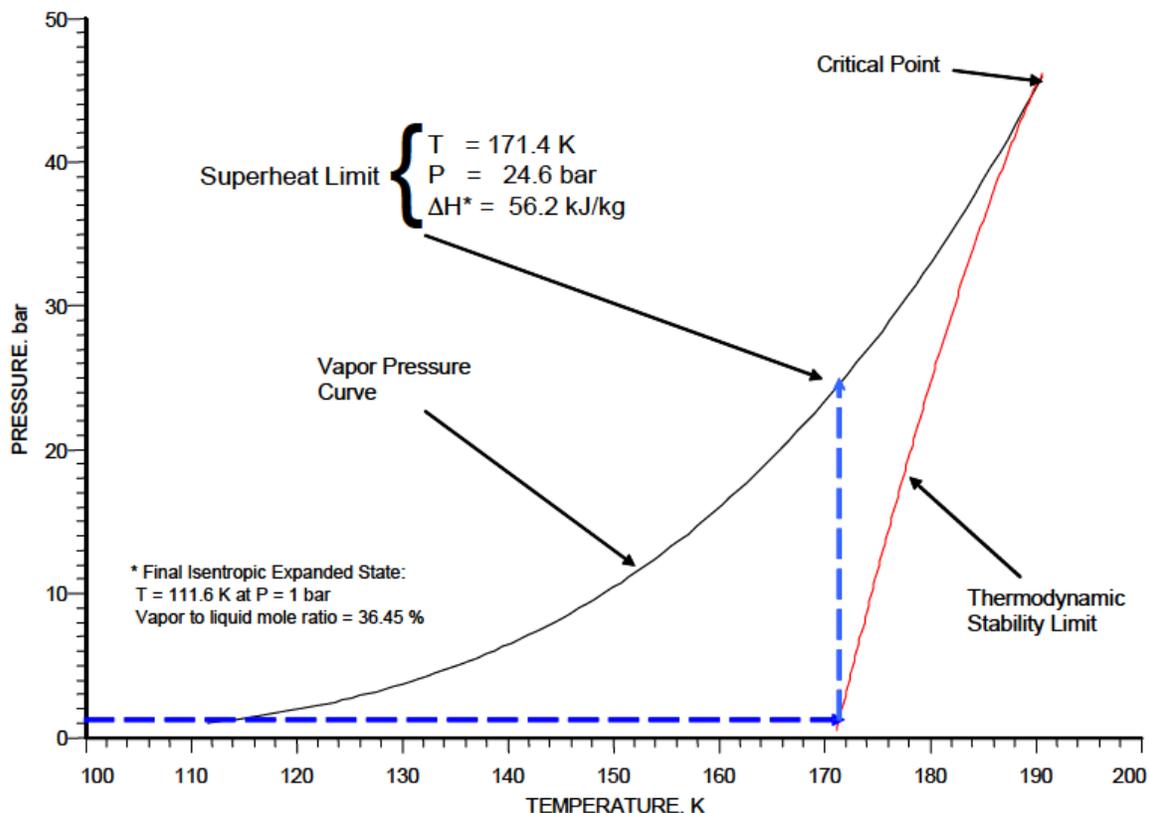


Figura 5.10 – Gráfico de Pressão vs. Temperatura de metano puro sofrendo uma RPT.

Na **Figura 5.11** apresenta-se gráfico semelhante, no entanto, para uma mistura de hidrocarbonetos leves típicos do GNL.

Analogamente ao explicado para o metano, o mesmo processo ocorre para o GNL. Como pode ser observado, para a mistura de hidrocarbonetos, o ponto de estabilidade termodinâmica atingido para temperatura e pressão são maiores do que para o metano puro, atingindo 191 K (-82°C) e 36,0 bar.

O objetivo da apresentação deste fenômeno é identificar um potencial evento que justificaria um aumento de pressão na região interna do tanque de armazenamento de GNL, visto que de acordo com o histórico de acidentes levantado e, de acordo com a literatura, a ocorrência de acidentes de consequências catastróficas são “ditas impossíveis”.

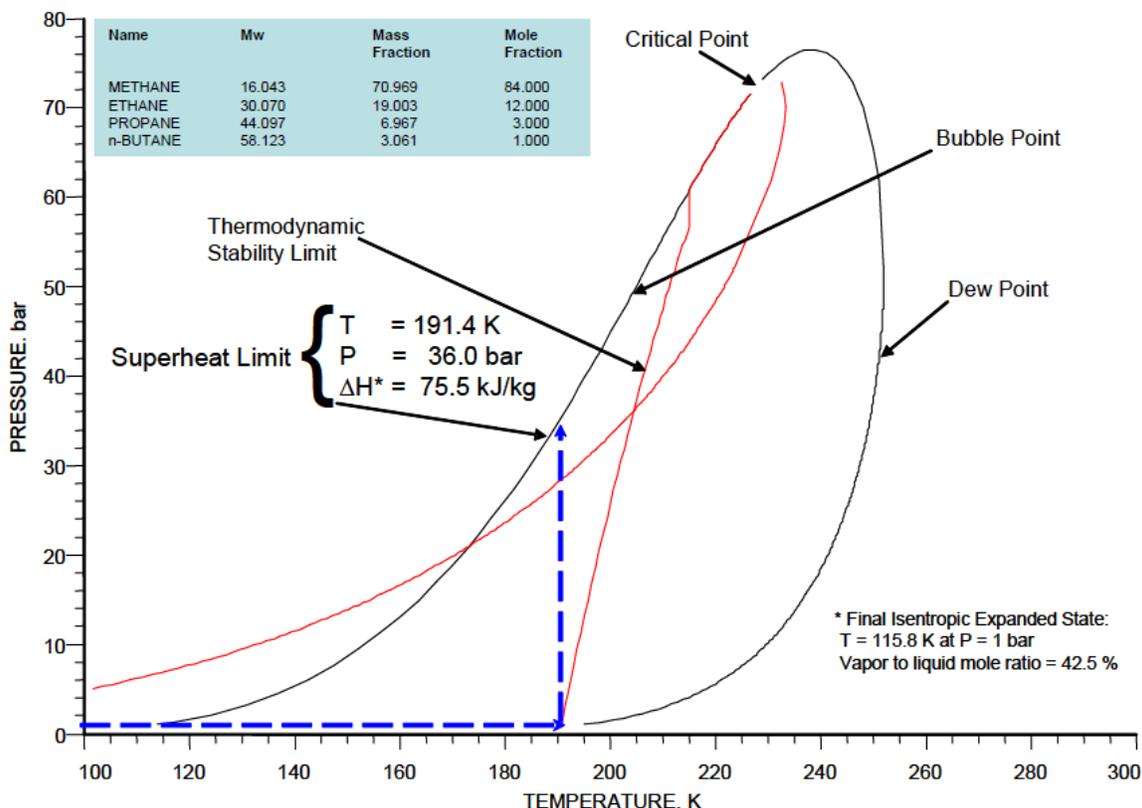


Figura 5.11 – Gráfico de Pressão vs. Temperatura de GNL com 84% molar de metano sofrendo uma RPT.

5.5 Cálculo das consequências

Conforme apresentado na Matriz de Risco, os cenários de maior relevância (risco mais elevado) estão ligados à ruptura do tanque de armazenamento de GNL – hipóteses acidentais 7, 10, 13 e 16.

As probabilidades e frequências relacionadas a este incidente foram avaliadas e apresentadas nas Árvores de Eventos (**Figuras 5.4 a 5.9**). Agora, segue estimativa, com auxílio do *software* ALOHA (EPA – Environmental Protection Agency) e do método do TNT equivalente, a área afetada efetivamente pelos cenários hipotéticos criados.

Dentre os cenários apontados, o único que não foi abordado neste trabalho foi o relativo a hipótese acidental 13 – nuvem inflamável. A probabilidade de ocorrência deste evento, de acordo com a literatura, é baixíssima. Complementarmente, sua área de incidência é significativamente inferior ao calculado na hipótese acidental 16 – BLEVE. Deste modo, optou-se por não incluí-lo na análise.

5.5.1 Liberação Tóxica

A hipótese acidental 7, identificada na APR, revelou a possibilidade de ocorrência de liberação tóxica de GNL, caso houvesse uma súbita ruptura do tanque de armazenamento.

Para este cenário foi utilizado o *software* ALOHA para calcular a região afetada em termos toxicológicos pelo vazamento hipotético do volume total de um dos cinco tanques esféricos do navio regaseificador.

A **Figura 5.12** apresenta o resultado da modelagem da dispersão do gás na atmosfera, formando uma pluma. A **Figura 5.13** apresenta a rotina computacional inserida no ALOHA com os parâmetros assumidos

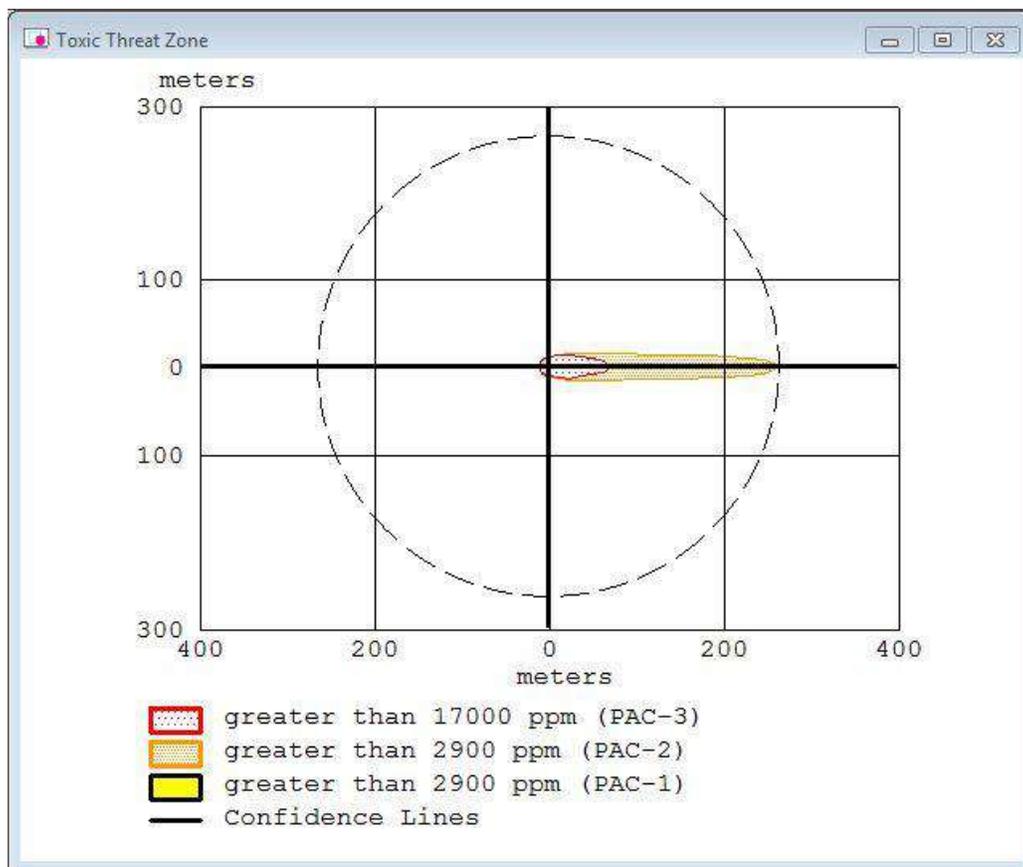


Figura 5.12 – Região afetada pela liberação tóxica.

O PAC – *Protective Action Criteria* – é utilizado para definir os diferentes níveis de toxicidade. Suas áreas características são apresentadas na **Tabela 5.4**:

Tabela 5.4 – Consequências esperadas para os diferentes níveis de toxicidade (DOE, 2008).

Nível de Toxicidade	Consequência Esperada
PAC-1	Danos não definitivos e amenos à saúde humana.
PAC-2	Danos irreversíveis ou sérios à saúde humana.
PAC-3	Ameaça à vida humana.

As ações referentes aos níveis descritos na **Tabela 5.4** ultrapassam o escopo deste trabalho e não serão mencionadas.

Para rodar as modelagens foi necessário especificar alguns parâmetros, conforme apresentado a seguir:

- Metano puro;
- Condições ambientais médias da região conforme relatório fornecido pela ASA – Applied Science Associates;
- Diâmetro do furo (4 cm);
- Tanque 100% cheio;
- Furo a 10m da parte inferior da esfera;
- Volume de uma esfera.

Os cálculos foram realizados à partir do Modelo de Pasquill-Gifford descrito anteriormente no item 3.5.2.1.

Considerou-se o GNL como sendo metano puro. Os dados atmosféricos utilizados foram baseados em dados reais específicos da região cedidos pela ASA – *Applied Science Associates* do ano de 2011. Os valores utilizados são médias das condições ambientais da região.

De acordo com TNO – *The Netherlands Organization of Applied Scientific Research* (2005) – o diâmetro de um furo em tubulações ou tanques deve estar compreendido entre 10 e 50 mm. Neste trabalho utilizou-se um diâmetro de furo de 40 mm.

5.5.2 Incêndio em poça

A hipótese acidental 10, identificada na APR, mostra a possibilidade de ocorrência de incêndio em poça do GNL, caso houvesse uma súbita ruptura do tanque de armazenamento.

Para este cenário novamente foi utilizado o *software* ALOHA para calcular a região afetada pela radiação térmica emanada do incêndio em poça. Considerou-se vazamento hipotético do volume total de um dos cinco tanques esféricos do navio regaseificador.

A **Figura 5.13** apresenta o resultado da modelagem com os parâmetros assumidos.

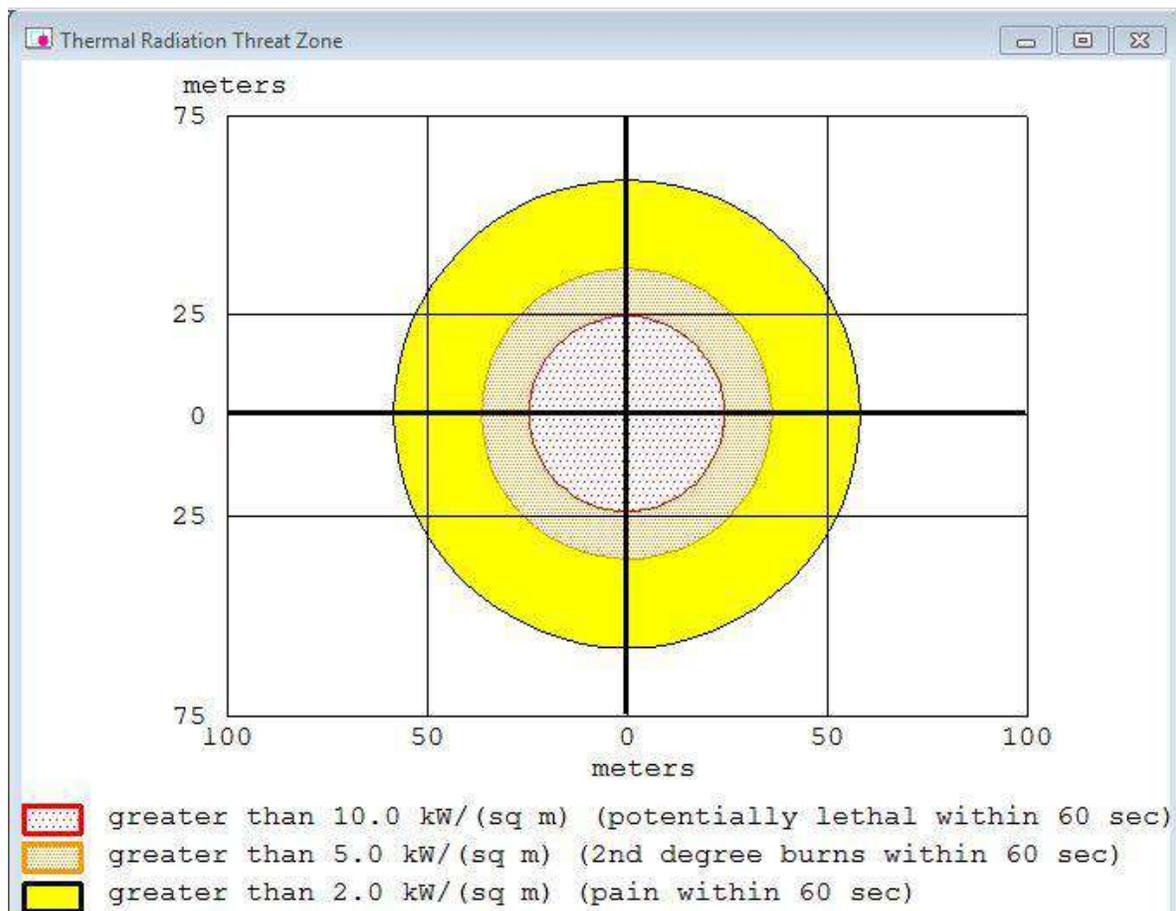


Figura 5.13 – Região afetada pelo incêndio em poça.

Como pode ser verificado a partir da **Figura 5.14** foram selecionados três raios dependentes das consequências observadas. Estes níveis são os padrões sugeridos pelo próprio *software*: 2,0, 5,0, e 10,0 kW/m². O primeiro nível é

referente severas dores causadas em até 60 segundos, o segundo nível refere-se a queimaduras de segundo grau em até 60 segundos e, por fim, o terceiro nível refere-se à possibilidade de morte em até 60 segundos. Dado o maior raio calculado ser da ordem de pouco mais de 50 m, não espera-se que uma região habitável seja afetada, visto que não há habitantes em raio inferior a 2 km.

Foram feitos também estimativas baseadas na norma CETESB P4.261 que estabelece os níveis de radiação térmica de $37,5 \text{ W/m}^2$ e $12,5 \text{ W/m}^2$ – que são grandezas estatisticamente equivalentes a 50% e 1% de probabilidade de fatalidades respectivamente (CETESB, 2003). A **Figura 5.15** apresenta o resultado referente a estes valores de radiação térmica.

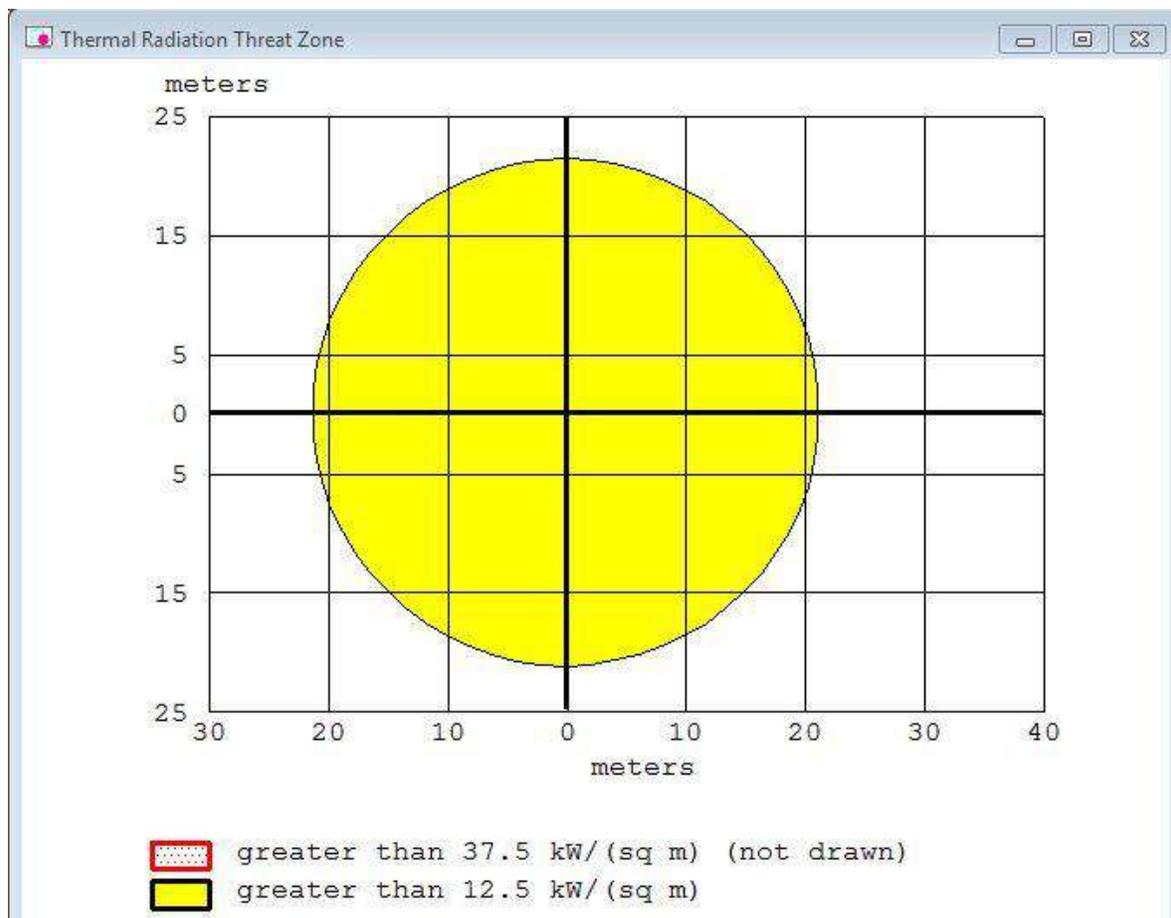


Figura 5.14 – Região afetada pelo incêndio em poça.

Como pode ser verificado na **Figura 5.15**, em nenhum momento a radiação térmica atingiu o limite de $37,5 \text{ W/m}^2$, ou seja, o limite de 50% de probabilidade de

fatalidade. A região de 1% de probabilidade de fatalidades é exibida na figura, e atinge pouco mais de 20 m no entorno da poça formada. Assim como comentado para a **Figura 5.13**, a região estudada não apresenta área habitável em um raio inferior a 2 km.

Para rodar as modelagens foi necessário especificar alguns parâmetros, conforme apresentado a seguir:

- Metano puro;
- Condições ambientais médias da região conforme relatório fornecido pela ASA – Applied Science Associates;
- Diâmetro do furo (4 cm);
- Tanque 100% cheio;
- Furo a 10m da parte inferior da esfera;
- Volume de uma esfera.

Os cálculos foram realizados à partir do Modelo de Radiação Térmica de Incêndio em Poça descrito anteriormente no item 3.5.2.1.

Considerou-se o GNL como sendo metano puro. Os dados atmosféricos utilizados foram baseados em dados reais específicos da região cedidos pela ASA – *Applied Science Associates* do ano de 2011. Os valores utilizados são médias das condições ambientais da região.

De acordo com TNO – *The Netherlands Organization of Applied Scientific Research* (2005) – o diâmetro de um furo em tubulações ou tanques deve estar compreendido entre 10 e 50 mm. Neste trabalho utilizou-se um diâmetro de furo de 40 mm.

5.5.3 BLEVE

Conforme apresentado anteriormente, a literatura aborda extensamente a improbabilidade de ocorrência de BLEVE em unidades de GNL. Contudo, para fins acadêmicos, essa questão foi abordada.

O principal intuito da inclusão da BLEVE é delimitar a área máxima que poderia ser atingida por qualquer incidente envolvendo a unidade regaseificadora de GNL, por mais grave que ele seja. Contudo, não há quaisquer registros históricos da ocorrência de BLEVE em unidades desta natureza.

Supondo um cenário improvável, porém plausível para justificar a inclusão da BLEVE na análise de risco. Primeiramente, deveria ocorrer um furo no tanque de armazenamento de GNL. Este furo, além de permitir o vazamento de parte do conteúdo, permitiria também a migração de ar rico em vapor d'água para o interior do vaso. O vapor, ao ser submetido à temperatura baixíssima existente no interior do tanque condensaria, trocando calor com o GNL. Esta troca de calor entre água e o GNL iria dar origem a um aumento súbito de pressão através do fenômeno de transição rápida de fases – *Rapid Phase Transition* (RPT). Esta elevação de pressão conduziria à ruptura súbita do tanque, dando origem a um incidente de BLEVE. Ao ocorrer a ruptura do tanque, e na presença de fonte de ignição próxima, seria registrada uma forte explosão.

O cálculo da área afetada pela onda de sobrepressão gerada explosão do inventário foi calculada para três subcenários provenientes da hipótese acidental 16:

- 16-A) Ocorrência de BLEVE supondo que o tanque de armazenamento da unidade regaseificadora esteja 40% cheio;
- 16-B) Ocorrência de BLEVE supondo que o tanque de armazenamento da unidade regaseificadora esteja 70% cheio;
- 16-C) Ocorrência de BLEVE supondo que o tanque de armazenamento da unidade regaseificadora esteja 100% cheio.

Os itens 16-A, 16-B e 16-C serão simulados matematicamente pelo método do TNT equivalente. Adotou-se como premissa que todo o conteúdo do tanque (40%, 70% ou 100%) seja imediatamente consumido na explosão.

Conforme apresentado no item 5.1, o tanque de armazenamento de GNL da unidade regaseificadora apresenta capacidade de 138.000 m³. De acordo com DOE (2008) a densidade de GNL encontra-se na faixa de 410 a 500 kg/m³. Neste trabalho consideraremos este valor como sendo 410 kg/m³.

Primeiramente será apresentada somente a massa de TNT equivalente para cada uma das hipóteses acidentais.

- **Hipótese acidental 16-A:** A ocorrência de explosão supondo que o tanque de armazenamento da unidade regaseificadora esteja 40% cheio.

$$m_{\text{GNL}} = \rho_{\text{GNL}} * V_{\text{tanque}} * \text{percentual de preenchimento}$$

$$m_{\text{GNL}} = 410 * 138.000 * 0,4$$

$$m_{\text{GNL}} = 2,26 \cdot 10^7 \text{ kg}$$

Como:

$$m_{\text{TNT}} = \frac{\eta m \Delta H_c}{E_{\text{TNT}}}$$

Para o caso de pior cenário, mais conservador, deve-se assumir $\eta=0,1$, a energia de explosão do TNT (E_{TNT}) é aproximadamente igual a 4686 kJ/kg, e o módulo do calor de explosão do metano é de 818,7 kJ/mol, então (Crowl & Louvar, 2011):

$$m_{\text{TNT}} = 0,1 \cdot 2,26 \cdot 10^7 \cdot (1/0,014) \cdot 818,7 \cdot 10^3 / 4686 \cdot 10^3$$
$$m_{\text{TNT}} = 2,82 \cdot 10^7 \text{ kg}$$

- **Hipótese acidental 16-B:** A ocorrência de explosão supondo que o tanque de armazenamento da unidade regaseificadora esteja 70% cheio.

$$m_{\text{GNL}} = \rho_{\text{GNL}} \cdot V_{\text{tanque}} \cdot \text{percentual de preenchimento}$$

$$m_{\text{GNL}} = 410 \cdot 138.000 \cdot 0,7$$

$$m_{\text{GNL}} = 3,96 \cdot 10^7 \text{ kg}$$

Como:

$$m_{\text{TNT}} = \frac{\eta m \Delta H_c}{E_{\text{TNT}}}$$

Para o caso de pior cenário, mais conservador, devemos assumir $\eta=0,1$, a energia de explosão do TNT (E_{TNT}) é aproximadamente igual a 4686 kJ/kg, e o módulo do calor de explosão do metano é de 818,7,3 kJ/mol, então (Crowl & Louvar):

$$m_{\text{TNT}} = 0,1 \cdot 3,96 \cdot 10^7 \cdot 818,7 \cdot (1/0,014) \cdot 10^3 / 4686 \cdot 10^3$$
$$m_{\text{TNT}} = 4,94 \cdot 10^7 \text{ kg}$$

- **Hipótese acidental 16-C:** A ocorrência de BLEVE supondo que o tanque de armazenamento da unidade regaseificadora esteja 100% cheio.

$$m_{\text{GNL}} = \rho_{\text{GNL}} \cdot V_{\text{tanque}} \cdot \text{percentual de preenchimento}$$

$$m_{\text{GNL}} = 410 \cdot 138.000 \cdot 1,0$$

$$m_{\text{GNL}} = 5,66 \cdot 10^7 \text{ kg}$$

Como:

$$m_{TNT} = \frac{\eta m \Delta H_c}{E_{TNT}}$$

Para o caso de pior cenário, mais conservador, deve-se assumir $\eta=0,1$, a energia de explosão do TNT (E_{TNT}) é aproximadamente igual a 4686 kJ/kg, e o módulo do calor de explosão do metano é de 818,7 kJ/mol, então (Crowl & Louvar, 2011):

$$m_{TNT} = 0,1 * 5,66 * 10^7 * 818,7 * (1/0,014) * 10^3 / 4686 * 10^3$$
$$m_{TNT} = 7,06 * 10^7 \text{ kg}$$

De acordo com a norma CETESB P4.261, para os casos de sobrepressões decorrentes de explosões deverão ser adotados os valores de 0,1 e 0,3 bar, referentes a consequências que ameaçam a vida humana. O primeiro corresponde à probabilidade de 1% de fatalidades e o segundo de 50%. Esta metodologia visa calcular o raio afetado pela explosão.

A partir da sobrepressão (p_0) pode-se, determinar a sobrepressão escalar, com base na pressão ambiente (101,3 kPa) através da relação abaixo (Crowl & Louvar, 2011):

$$p_s = \frac{p_0}{p_a}$$

Desta forma, tem-se que:

$$p_{s,1} = 9,87 * 10^{-2} \text{ (calculado para 0,1 bar)}$$

$$p_{s,2} = 2,96 * 10^{-1} \text{ (calculado para 0,3 bar)}$$

De acordo com Crowl & Louvar (2011) a correlação entre distância escalar (Z_e) e sobrepressão escalar (p_s) apresentada no gráfico da **Figura 3.12**, é resultado da seguinte equação empírica:

$$p_s = \frac{1616(1 + (\frac{Z_e}{4,5})^2)}{\sqrt{1 + (\frac{Z_e}{0,048})^2} * \sqrt{1 + (\frac{Z_e}{0,32})^2} * \sqrt{1 + (\frac{Z_e}{1,35})^2}}$$

Assim, pode-se determinar as distâncias escalares proporcionais às sobrepressões escalares calculadas anteriormente:

$$Z_{e,1} = 17,79 \text{ m/kg}^{1/3}$$

$$Z_{e,2} = 7,48 \text{ m/kg}^{1/3}$$

De acordo com Crowl & Louvar (2011) a distância escalar (Z_e) relaciona-se com a massa de TNT equivalente pela equação:

$$Z_e = \frac{r}{m_{TNT}^{1/3}}$$

No início deste item foi realizado o cálculo das respectivas massas de TNT equivalente à massa de metano, referentes aos três subcenários A, B e C. Em posse destes valores, é possível obter o raio afetado pela explosão em estudo. A **Tabela 5.5** que resume os resultados obtidos – raios expressos em quilômetros.

Tabela 5.5 – Raios afetados pela BLEVE calculados em vista da hipótese acidental 16 e seus respectivos subcenários A, B e C.

HA-16	$m_{TNT}(\text{kg})$	$Z_{e,1} (\text{m/kg}^{1/3})$	$Z_{e,2} (\text{m/kg}^{1/3})$	$r_1 (\text{km})$	$r_2 (\text{km})$
A	2,82E+07	17,79	7,48	5,42	2,28
B	4,94E+07	17,79	7,48	6,53	2,74
C	7,06E+07	17,79	7,48	7,35	3,09

Com base nos raios encontrados referentes às sobrepressões de 0,1 bar e 0,3 bar, projeta-se a região geográfica afetada pela explosão na imagem de satélite da região. O resultado pode ser observado nas **Figuras 5.15 a 5.20**.

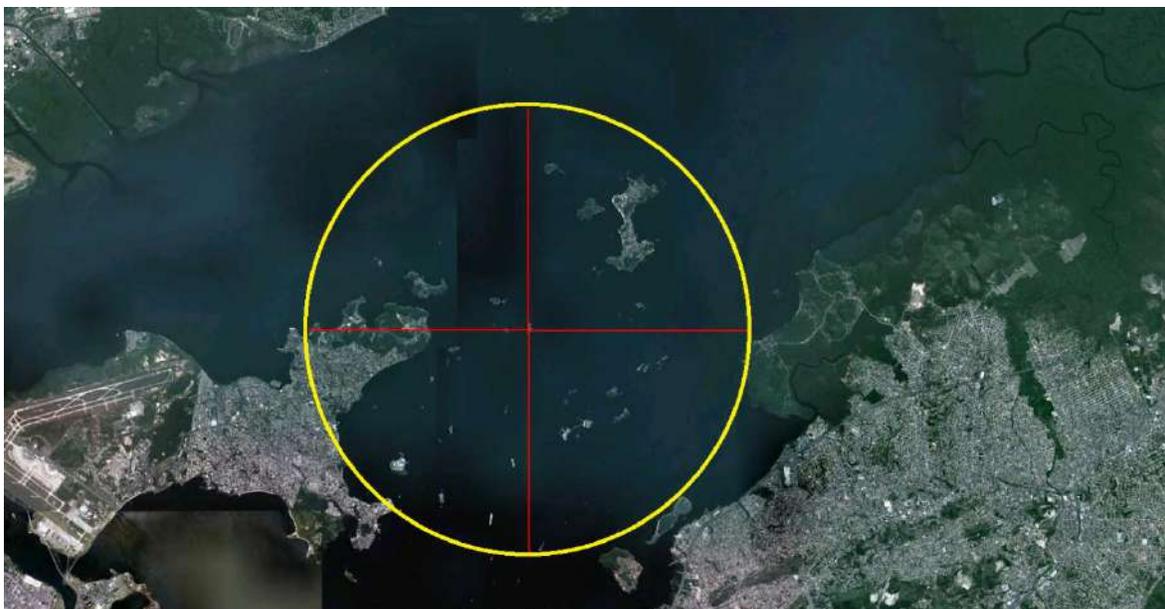


Figura 5.15 – Área afetada pela BLEVE de 40% do volume total do tanque do navio regaseificador. Em amarelo a área referente à sobrepressão de 0,1 bar.

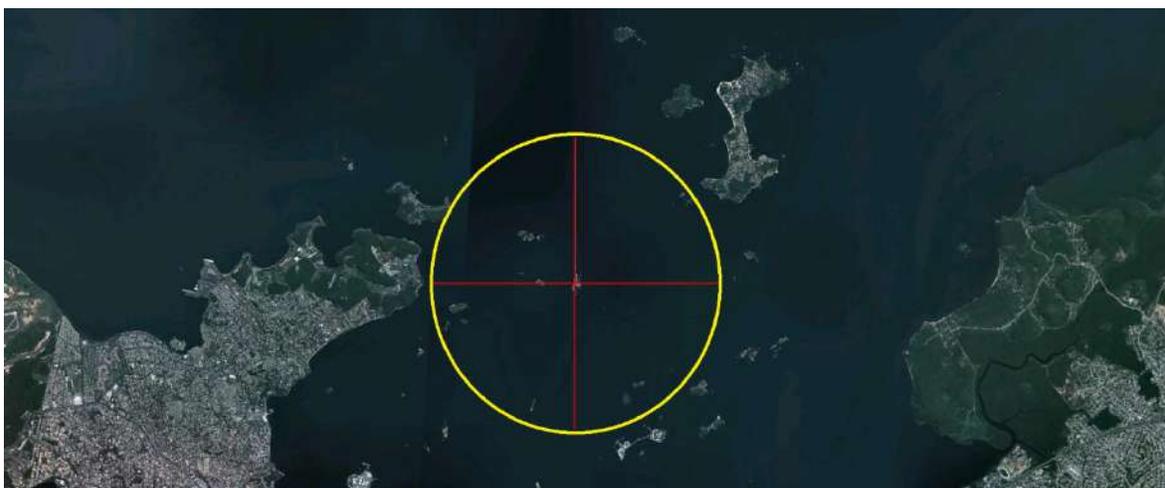


Figura 5.16 – Área afetada pela BLEVE de 40% do volume total do tanque do navio regaseificador. Em amarelo a área referente à sobrepressão de 0,3 bar.

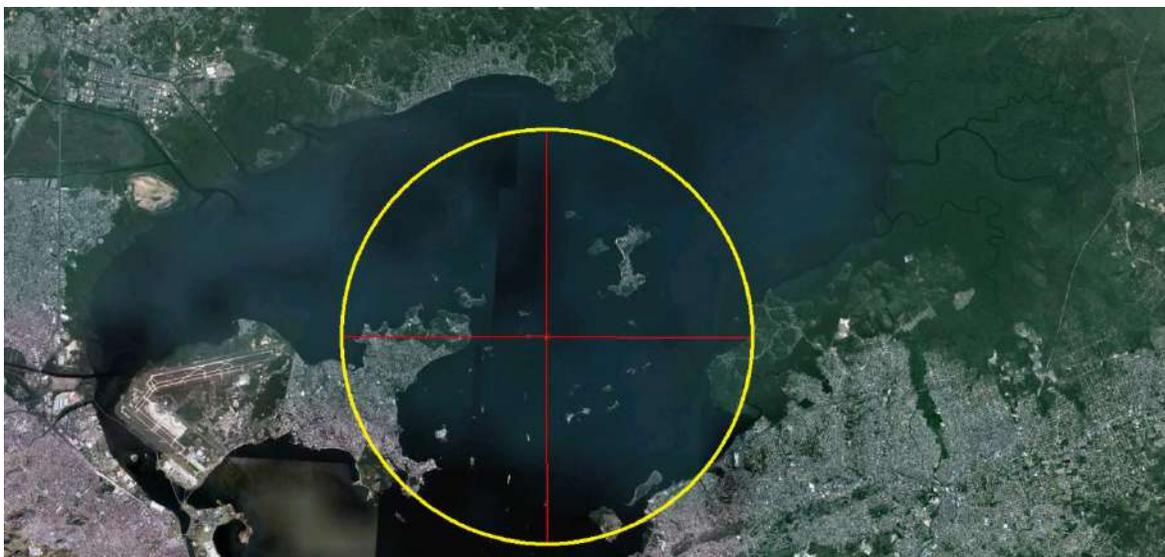


Figura 5.17 – Área afetada pela BLEVE de 70% do volume total do tanque do navio regaseificador. Em amarelo a área referente à sobrepressão de 0,1 bar.

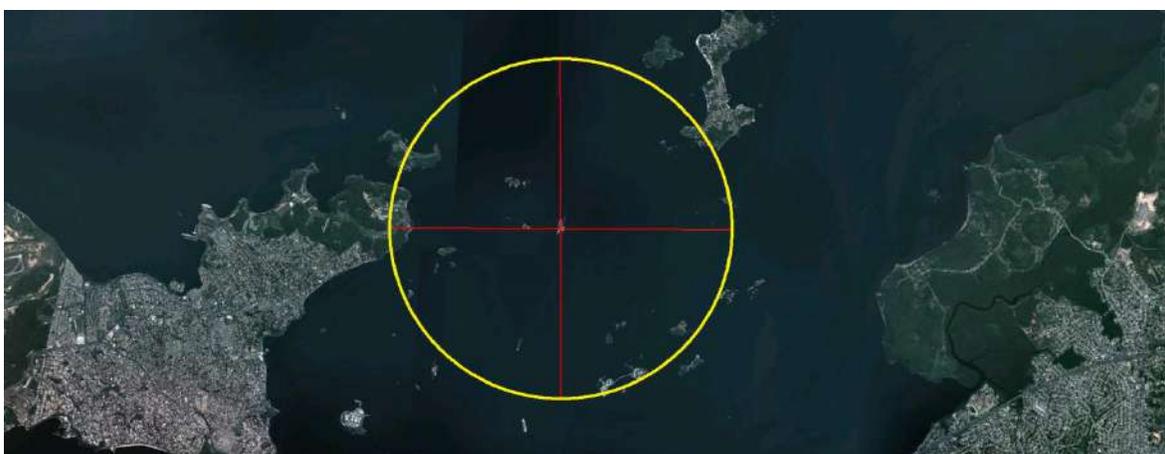


Figura 5.18 – Área afetada pela BLEVE de 70% do volume total do tanque do navio regaseificador. Em amarelo a área referente à sobrepressão de 0,3 bar.

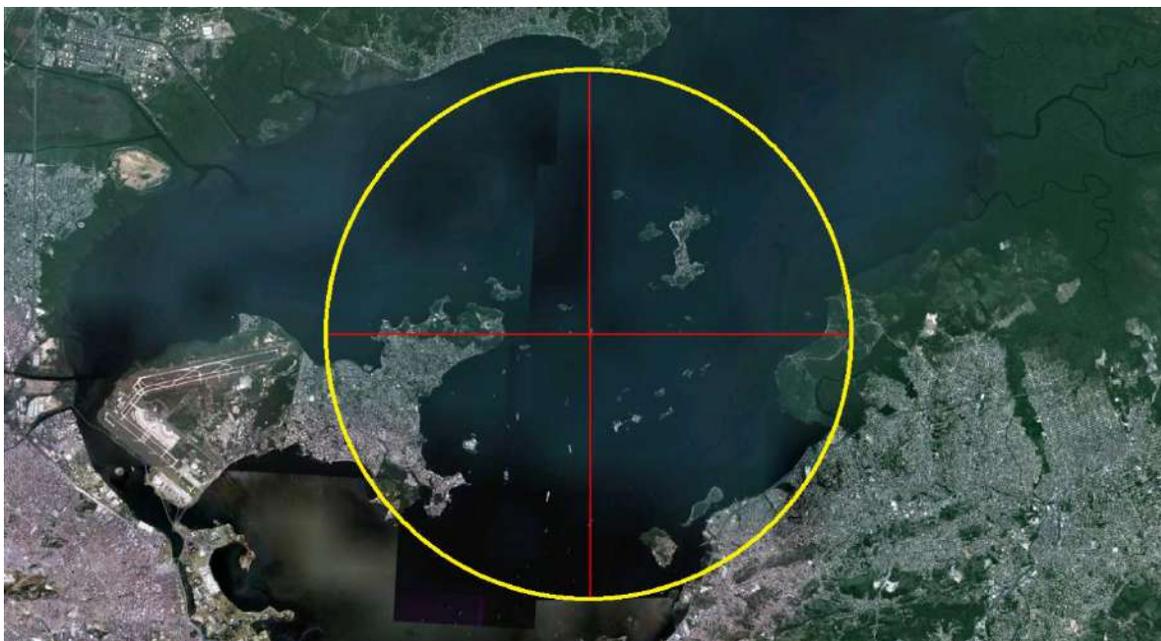


Figura 5.19 – Área afetada pela BLEVE de 100% do volume total do tanque do navio regaseificador. Em amarelo a área referente à sobrepressão de 0,1 bar.

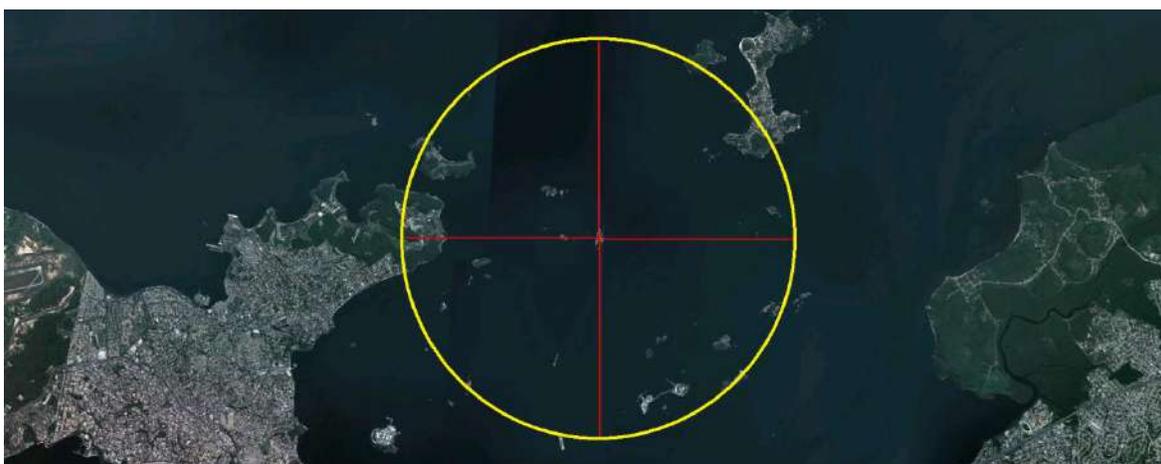


Figura 5.20 – Área afetada pela BLEVE de 100% do volume total do tanque do navio regaseificador. Em amarelo a área referente à sobrepressão de 0,3 bar.

Através das figuras pode-se concluir que apenas o evento que ocorre com 40% do tanque de GNL preenchido é que não apresenta potencial de gerar danos drásticos às populações vizinhas.

Os demais eventos atingem parte do bairro da Ilha do Governador. Este bairro possui uma densidade demográfica de 5.598,2 hab/Km² (SEBRAE, 2011). Sendo assim, a população seria afetada caso o cenário simulado se concretiza-se. Isso

ocorreria mesmo considerando o afastamento entre a zona urbana e a instalação industrial.

Nos itens 5.6 e 5.7 são avaliados o risco social e individual de cada área atingida a partir dos raios calculados neste item.

5.6 Risco Social

Para o cálculo do risco social utilizou-se a planilha apresentada na **Tabela 3.5**. Neste trabalho foi incluído apenas o risco social associado ao cenário de pior caso de cada uma das consequências, isto é, foi suposto o cenário de ruptura do tanque de armazenamento de GNL.

A **Tabela 5.6** resume os resultados encontrados, de acordo com os requisitos da norma CETESB P4.261 (CETESB, 2003).

Como pode ser verificado pela tabela, o nível de fatalidades atingido é superior à zona estabelecida como considerada segura. Isto é, de acordo com o código de classificação da norma P4.261 do CETESB, os incidentes de BLEVE estariam classificados na zona de intoleráveis, contudo, devem-se ressaltar que sua probabilidade de ocorrência na realidade é muito inferior ao nível de frequência estimado, visto que foram assumidos como certos (probabilidade de 100%) alguns eventos que são bem improváveis, conforme apresentado na descrição hipotética do cenário no item 5.5.3.

Tabela 5.6 – Risco social calculados aos cenários de pior caso.

Evento	Frequência (ocorrência/ano)	% Fatalidade	Alcance (m)	Fator multiplicativo	Área habitável da conseq. Acidental (m²)	Número de Pessoas expostas externa à unidade por m2	Danos (Fatal./ocor.)	Risco (Fatal./ano)
Liberação Tóxica (PAC-1 e PAC-2)	3,43E-05	0%	67	-	0	0	0	0
Liberação Tóxica (PAC3)	3,43E-05	0%	265	-	0	0	0	0
Incêndio em poça (12,5 w/m ²)	7,35E-06	1%	21	0,25	0	0	0	0
Incêndio em poça (37,5 w/m ²)	7,35E-06	50%	0	0,75	0	0	0	0
BLEVE (0,1 bar)	1,00E-06	1%	7350	0,25	1,44E+07	5,59E-03	2,02E+04	2,02E-02
BLEVE (0,3 bar)	1,00E-06	50%	3090	0,75	3,61E+06	5,59E-03	1,51E+04	1,51E-02

5.7 Risco Individual

O Risco Individual pode ser quantificado como a razão entre a magnitude do risco social e o número de pessoas expostas.

Para calcular o risco individual de uma instalação industrial qualquer, devem ser considerados todos os cenários acidentais relacionados e que apresentem possibilidade de gerar fatalidades. Contudo, a exemplo do item anterior (risco social), optou-se neste estudo por limitar a análise aos cenários de pior caso.

Deste modo, foram calculados o risco individual para a operabilidade da unidade de regaseificação de GNL a partir do somatório do risco social calculado a partir do item anterior e dividindo-o pelo total de pessoas possivelmente expostas. O risco individual calculado foi de $9,99 \cdot 10^{-7}$ fatalidades/ano.

5.8 Plano de Ação de Emergência (PAE)

O gerenciamento de risco deve possuir medidas para prevenir a ocorrência de acidentes mais graves, bem como um plano de ação para minimizar ao máximo as consequências geradas pelos mesmos. A este plano de ação foi dado o nome de Plano de Ação de Emergência (PAE). O PAE tem como objetivo gerar respostas imediatas e eficientes em situações de emergência.

O PAE é desenvolvido a partir das avaliações feitas através das análises de risco para determinada planta industrial. Este plano de emergências deve levar em consideração os possíveis cenários acidentais, podendo assim ter uma diretriz para cada acontecimento com plano de resposta compatível.

De um modo geral, o PAE deve possuir a seguinte estrutura (CETESB, 2003):

- Introdução;
- Características das instalações e atividades;
- Objetivo
- Área de abrangência;
- Estrutura organizacional;

- Acionamento;

- Procedimentos de combate:
 - Avaliação;
 - Isolamento e evacuação;
 - Combate a incêndios;
 - Controle de vazamentos;
 - Reparos de emergência;
 - Ações de rescaldo (pós-emergenciais).

- Anexos:
 - Formulário de registro de ocorrências;
 - Lista de acionamento;
 - Recursos materiais;
 - Fichas de informação sobre substâncias químicas.

Alguns procedimentos podem ser padronizados, pois possuem características comuns. Entretanto, é importante que cada evento possua uma diretriz própria, pois dessa forma, as chances de minimizar as consequências ao máximo são maiores. Através das análises de risco realizadas e projetos de simulação dos possíveis cenários é possível a criação de um plano individual para cada acontecimento.

Os resultados obtidos nas simulações podem fornecer dados sobre as possíveis áreas afetadas pelo acidente. Dessa maneira, é possível realizar a classificação dessas áreas, possibilitando um plano mais eficaz, como o isolamento de áreas de acordo com a magnitude dos eventos previamente estudados.

Neste estudo foram levados em consideração eventos relacionados a vazamentos tóxicos, explosão e incêndio. Dessa forma, a **Tabela 5.7** apresenta as ações de controle para os impactos esperados.

Tabela 5.7 – Ações de controle para os impactos esperados (CETESB, 2003).

IMPACTO	ÁREA 1 (risco de vida)	ÁREA 2 (risco à saúde)	ÁREA 3 (mal-estar)
Explosão	Isolamento e evacuação da área	Remoção de pessoas	Isolamento da área
Incêndio	Isolamento e evacuação da área. Uso de roupas especiais	Isolamento e evacuação da área	Uso de roupas especiais
Vazamento Tóxico	Isolamento e evacuação da área. Uso de roupas especiais	Remoção de pessoas de alto risco	Isolamento. Fechamento de portas e janelas.

6. Conclusão

Este trabalho demonstrou como o gás natural está se consolidando na matriz energética de países como o Japão, grande importador de derivados do petróleo e como o Brasil, pesquisador de fontes alternativas de energia. Com base nos estudos de mercado de importações e exportações, verificou-se a importância de liquefazer o GN, promovendo sua purificação que podem trazer riscos ao seu manuseio além de possibilitar uma redução de até 600 vezes o volume ocupado pelo mesmo em seu estado natural.

Com base no aumento do comércio de GNL, estações de regaseificação passaram a ganhar importância no cenário mundial. A tabela 2.3 exemplificou a quantidade de plantas instaladas e a expectativa de construção de mais plantas pelo mundo. De acordo com os dados obtidos, verifica-se que se todos os projetos forem concretizados o número de instalações praticamente dobraria.

Estações de manuseio de GNL apresentaram eventos catastróficos no passado, como os acidentes ocorridos em Skikda, na Argélia em 2004, ferindo 72 pessoas. Nesse contexto, os riscos inerentes ao manuseio de GNL devem ser considerados, possibilitando assim a adoção de medidas que minimizem a ocorrência de acidentes. Para classificar estes possíveis eventos foram utilizadas ferramentas como as de Análises de Risco. Com os dados obtidos foi possível identificar os principais eventos e simular suas possíveis consequências.

O estudo através da Análise Qualitativa de Riscos demonstrou a inexistência de acidentes caracterizados como sérios ou graves segundo a matriz de risco. Desta forma, foram utilizados os riscos classificados como “*menor*” segundo a matriz de risco apresentada no capítulo 5. Pode-se notar, conforme a análise feita através da tabela 5.1, que todos os riscos estão vinculados a grandes liberações, acima de 200 m³ (CONAMA, 2008), de GNL.

Conforme mostrado neste trabalho, a Análise Preliminar de Riscos fornece dados para que os principais incidentes relatados pela mesma sejam calculados através de uma Análise Quantitativa de Riscos. As probabilidades de ocorrência de cada um dos eventos previamente identificados demonstraram que o de menor probabilidade possui as consequências mais graves. Entretanto, como já foi mencionado anteriormente neste trabalho, apesar do risco ser muito baixo ele existe e por isso deve ser levado em consideração.

Os resultados obtidos através das simulações realizadas e da Análise Preliminar de Perigos e Análise Qualitativa de riscos demonstram que instalação de uma estação de regaseificação na Baía de Guanabara pode ser considerada segura. Apesar dos resultados obtidos pela simulação do BLEVE apontarem para uma área afetada na região da Ilha do Governador, a probabilidade de ocorrência deste evento é muito baixa.

Desta forma, pode-se classificar a instalação como segura do ponto de vista de sua localização, uma vez que o pior dos cenários possui uma probabilidade baixa e uma área afetada de baixa densidade demográfica.

Devido às limitações definidas no escopo do projeto, foi identificada a possibilidade de realizar uma análise econômica mais completa do mercado de GNL, apresentando perspectivas futuras.

Além disso, do ponto de vista de segurança, seria interessante verificar a influência dos diferentes coeficientes de estabilidade atmosférica nos resultados; isto é, variar diferentes condições ambientais de modo a verificar cenários limítrofes – velocidade do vento, períodos noturnos, temperaturas altas e baixas, etc.

7. Referências bibliográficas

- 1) ABS CONSULTING. Estudo de Análise de Riscos do Terminal Flexível de GNL na Baía de Guanabara, ABS PID 1678989-001, de 27/02/2007. Rio de Janeiro, 2007.
- 2) ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. O Gás Natural Liquefeito no Brasil: Experiência da ANP na implantação dos projetos de importação de GNL. Rio de Janeiro, 2010.
- 3) AIChE. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2nd ed., American Institute of Chemical Engineers/AIChE, 2000.
- 4) BRASIL, Consultoria Legislativa da Câmara dos Deputados. Legislação Brasileira Sobre Poluição do Ar, Junho 2007. Disponível em: http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/1542/legislacao_poluicao_ar_jose_pereira.pdf?sequence=1
- 5) CIA – CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY. DADOS VOLUMÉTRICOS DE RESERVAS DECLARADAS DE GÁS NATURAL NO MUNDO, 2012. Disponível em: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2179rank.html>
- 6) CEE – Center for Energy Economics. Introduction to LNG: an overview on Liquefied Natural Gas (LNG), its properties, the LNG industry, safety considerations. Sugar Land, Estados Unidos, 2003. Disponível em: <http://www.beg.utexas.edu/energyecon/lng/documents/CEE_INTRODUCTION_TO_LNG_FINAL.pdf>. Acesso em: 14 out. 2012-11-27
- 7) CETESB. Manual de orientação para a elaboração de estudos de análise de riscos. São Paulo, 2003.
- 8) CIEB – Centro de Instrução Especializada de Bombeiros. Termodinâmica da Combustão. Disponível em: http://www.cieb.cbmerj.rj.gov.br/documentos/Material_downloads/Cap_1.pdf
- 9) CLEAVER, Phillip; HUMPHREYS, Carol; GABILLARD, Michel; NEDELKA, Dominique; HEIERSTED, R. S.; DAHLSVEEN, Jan. Transition Rapide de Phase de GNL. BG Group, 1998.

- 10) CO2CRC. IMAGEM DE DISPERSÃO EM PLUMA, 2012. Disponível em:
<http://www.co2crc.com.au/imagelibrary3/storage.php?screen=2>
- 11) CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA, 2008. Disponível em:
<http://4ccr.pgr.mpf.gov.br/institucional/grupos-de-trabalho/gt-aguas/resolucoes-conama-docs/res39808.pdf>
- 12) CROWL & LOUVAR. Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications. Prentice Hall, 3rd ed., 2011.
- 13) DOE - UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. DOE approves LNG export application (june, 3rd, 2008). Washington, DC, [ca. 2008]. Disponível em:
http://www.international.energy.gov/news/techlines/2008/08018-DOE_Approves_LNG_Application.html
- 14) ESS – ENVIRONMENTAL SOFTWARE AND SERVICES. IMAGEM DE DISPERSÃO EM PUFF, 2012. Disponível em:
<http://www.ess.co.at/RISK/IMAGES/images.html>
- 15) Filho, J.; Newman, D. Gestão e Gerenciamento de Risco Ambiental I. Artigo publicado na revista Banas Ambiental – Ano II – nº12 – Junho de 2001.
- 16) FOSS, M. M. Introduction to LNG. Houston, Estados Unidos: Center for Energy Economics, 2007.
- 17) FLOTHMAN, D. & MJAAVATTEN, A., 1993. Qualitative methoden der storfall-identification – praktische erfahrungen aus der anwendung auf flussiggas – lgerung. Der Maschienchaden, 54: 31-33.
- 18) FLYNN, T. M. Cryogenic engineering, 2nd ed., New York: Marcel Dekker, 2005.
- 19) GOOGLE MAPS. INFORMAÇÕES E IMAGENS DE GEORREFERENCIAMENTO DA UNIDADE REGASEIFICADORA DE GNL NA BAÍA DE GUANABARA, 2012. Disponível em:
<http://www.maps.google.com>

- 20)HALFORD, C.D.; GOGLIA, J.J.; STOLZER, A.J. Safety Management Systems in Aviation, 2008.
- 21)IEA – International Energy Agency. Natural Gas Information, 2010. Disponível em: <http://www.iea.org/Textbase/nptoc/Gas2010TOC.pdf>
- 22)KERZNER, Harold. Project Management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling, 6th ed., 1998.
- 23)LEES, F. P. Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification, Assessment and Control, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 1996.
- 24)NFPA World Safety Conference June 5, 2006. Disponível em:
http://www.lngpedia.com/wp-content/uploads/lng_health_safety_environment/LNG%20Incident%20Cleveland,%20Ohio%201944%20-%20Lemoff%20%28Southern%20Gas%20Assoc%29.pdf
- 25)NIST – National Institute of Standards and Technology. Thermal Radiation from Large Pool Fires, 2000.
- 26)PETROBRÁS, Revista Petrobrás. Uma revolução chamada GNL. Rio de Janeiro, Julho 2007 p 23.
- 27)SEBRAE. INFORMAÇÕES SOCIOECONÔMICAS DA REGIÃO ADMINISTRATIVA ILHA DO GOVERNADOR. Rio de Janeiro, 2011.
- 28)SMITH, Preston G.; MERRIT, Guy M. Proactive risk management: controlling uncertainty in product development, 2002.
- 29)SHIVELY, B.; FERRARE, J.; PETTY, B. Understanding Today's Global LNG Business. 2nd Edition. Enerdynamics, 2010.
- 30)SINDIPETRO, Acidentes Registrados Pelo Sindicato. Disponível em: www.sindipetrocaxias.org.br
- 31)Sulgás. Gás Natural no Mundo, 2005. Disponível em <http://www.sulgas.rs.gov.br/>
- 32)SUTTON, O.G. Micrometeorology. NewYork: McGraw-Hill, 1953.

- 33)TNO, Guidelines for quantitative risk assessment (Purple Book – CPR 18E), 3rd ed., 2005.
- 34)USP. Apostila de Gerência de Riscos (EST-701) da Universidade de São Paulo – Escola Politécnica da USP, 2011
- 35)WIDEMAN, R. Max. Project and Program Risk Management: a guide to managing project risks and opportunities, 1992.