



PROGRAMA EQ-ANP

Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria do Petróleo e Gás Natural



**Aplicação de Modelagem Fenomenológica de BLEVE em Cenários
Acidentais Envolvendo Reservatórios de GNL**

Vitor Cersosimo Esposito

Projeto de Final de Curso

Orientador

Carlos André Vaz Junior

Dezembro de 2013

**Aplicação de Modelagem Fenomenológica de BLEVE em Cenários
Acidentais Envolvendo Reservatórios de GNL**

Vitor Cersosimo Esposito

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente do Programa Escola de Química/Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria de Petróleo e Gás Natural, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Químico com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Gestão e Regulação.

Aprovado por:

.

.

.

Orientado por:

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Dezembro de 2013

Esposito, Vitor Cersosimo Esposito.

Aplicação de Modelagem Fenomenológica de BLEVE em Cenários Acidentais Envolvendo Reservatórios de GNL/ Vitor Cersosimo Esposito. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2013.

XIII, 69 p.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2013. Orientador: Carlos André Vaz Junior

1. Segurança. 2. BLEVE. 3. GNL. 4. Projeto Final (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Carlos André Vaz Junior

Dedicatória

Dedico este projeto a todos que estão comigo durante todo o percurso da faculdade, a minha família pequena, mas grandiosa demais para mim, principalmente ao meu avô, que não está aqui presente, mas esta graduação é pra você vô.

Citação

“O ontem é história, o amanhã é um mistério, mas o hoje é uma dádiva. É por isso que se chama presente.”

Kung Fu Panda

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo – ANP – e da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT, em particular ao PRH 13, da Escola de Química - Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria do Petróleo e Gás Natural.

Agradeço ao orientador Carlos André Vaz Junior, pelo auxílio no desenvolvimento do projeto e principalmente pela confiança atribuída a mim.

Agradeço a Bia, pelo apoio nos momentos críticos da faculdade, pela força pra continuar em frente e pela esperança quando nada parecia dar certo.

Agradeço aos meus pais, Rosangela e Giovanni, pelo apoio incondicional, pela luta diária, por terem me dado a melhor base acadêmica possível, por tentarem fazer minha vida melhor.

Agradeço a minha avó, Ângela, por ter me criado e ter sido a melhor avó que alguém poderia ter.

Agradeço a minha tia, Florinda, por ter me ajudado sempre que necessário, por todos os conselhos e trabalhos, sem ela esta graduação teria sido muito mais difícil.

Agradeço ao meu avô, Hélio, meu amigo, meu pai, meu avô, meu irmão, meu exemplo, a pessoa que passou mais tempo comigo na minha infância e a pessoa a qual levarei pra sempre comigo, obrigado vô.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Gestão e Regulação.

Aplicação de Modelagem Fenomenológica de BLEVE em Cenários Acidentais Envolvendo Reservatórios de GNL

Vitor Cersosimo Esposito

Dezembro de 2013

Orientador: Carlos André Vaz Junior

A sociedade necessita cada vez mais de energia para suas atividades diárias. O desenvolvimento industrial e tecnológico incorporaram uma série de facilidades que antes não existiam. Porém, tais facilidades dependem fortemente do constante consumo de energia, seja, por exemplo, na forma de energia elétrica, gases combustíveis ou combustíveis líquidos para veículos. Dentre as principais fontes energéticas atualmente em uso encontra-se o gás natural. Trata-se de um combustível de alto rendimento, baixo custo e pequena geração de poluentes quando comparado com outras opções. Em paralelo ao desenvolvimento e crescente uso do gás natural como combustível, aumenta também a necessidade de estudos de segurança de processos. Desta forma, o conhecimento prévio sobre os possíveis perigos e riscos envolvidos na manipulação, armazenagem e uso do gás natural torna-se fundamental. A análise das consequências de possíveis cenários acidentais é de indispensável notoriedade dentro deste cenário, respaldada por uma sequência histórica de graves acidentes. Muitos dos acidentes envolvendo grandes reservatórios GNL desenvolvem-se na formação de BLEVEs (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion). O BLEVE é a explosão do vapor gerado pelo líquido em ebulição. Este projeto foi proposto com o objetivo de realizar um estudo fenomenológico sobre o evento do BLEVE, partindo da análise fenomenológica do evento, descrevendo-o, caracterizando-o e modelando suas consequências. Foram realizadas simulações matemáticas com possíveis cenários acidentais de BLEVE, sendo utilizado o *software* ALOHA para as mesmas e como resultados obteve-se o tempo de queima, o tamanho da bola de fogo, e zonas de vulnerabilidade para determinados tipos de consequência. Conclusões sobre o tipo de recipiente em que ocorre o evento foram alcançadas.

Abstract of a Final Project presented to Escola de Química/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Chemical Engineer with emphasis on Petroleum and Natural Gas – Management and Regulation.

Application of Phenomenological Modeling of BLEVE at Accidental Scenarios Involving LNG Tanks

Vitor Cersosimo Esposito

December of 2013

Supervisor: Carlos André Vaz Junior¹.

Increasingly, modern society needs energy for its existence because of the industrial development and technology is part of everyday life today. Nowadays, natural gas is among the main energy sources in use due to its of high performance, low cost and small generation of pollutants when compared with other options. Parallel to this development and industrialization the need for safety studies and preparation of emergency plans also rises. Thus prior knowledge about the possible dangers and risks involved in handling LNG and its storage becomes critical. Thus the analysis of the consequences of possible accident scenarios is essential within this scenario and supported by a series of historical accidents this project was proposed in order to perform a phenomenological study about the BLEVE event (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) also known as the explosion of the expanded steam boiling liquid. Starting from the phenomenological analysis of the event, it is possible to describe it characterizing it and modeling the consequences. In order to finalize, mathematical simulations were performed with possible accident scenarios of BLEVE, and ALOHA software was used for realizing the studies. As results of these simulations was obtained the time of burning, the size of de fireball and the vulnerability curves for certain kinds of consequence. Conclusions about the type of container where the event occurs was achieved.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Objetivo.....	2
1.2. Organização	2
2. Contextualização	3
2.1. Gás Natural.....	3
2.2. Gás Natural Liquefeito.....	7
2.2.1. Definição.....	7
2.2.2. Logística Econômica.....	8
2.2.3. Etapas de Formação do GNL.....	10
2.2.4. Futuro e desafios.....	11
2.3. Segurança.....	12
2.3.1. Introdução a Segurança de Processos.....	14
2.3.2. Caracterização de Acidentes.....	15
2.3.3. Gerenciamento de Riscos.....	16
2.3.4. Mapeamento dos efeitos físicos.....	18
2.4. Aloha software.....	19
3. Estudo de BLEVE.....	20
3.1. Introdução	20
3.2. Mecanismo do BLEVE.....	25
3.3. Impacto ou consequências do BLEVE.....	28
3.3.1. Radiação Térmica.....	28
3.3.2. Modelagem da radiação térmica de BLEVE.....	30
3.4. Ações preventivas e mitigadoras.....	34

4. Análise Histórica.....	35
4.1. Acidentes.....	35
4.1.1. Acidente de Feyzin, França.....	38
4.1.2. Acidente da Reduc, Rio de Janeiro, Brasil.....	41
5. Estudo de caso.....	44
5.1. Premissas.....	44
5.2. Casos.....	45
6. Conclusão e propostas futuras.....	63
6.1. Conclusão	63
6.2. Propostas Futuras.....	64
Referências Bibliográficas.....	65
Apêndice.....	68

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Reservas Provadas de Gás Natural no território brasileiro de 1965 à 2010 (ANP, 2011)	5
Figura 2.2 – Distribuição percentual das reservas provadas de gás natural no território nacional em 2010 (ANP, 2011).....	6
Figura 2.3 – Consumo de gás natural no mundo (EIA, 2009).....	6
Figura 2.4 – Sistema de distribuição de Gás Natural (Shively, Ferrare, Petty, 2010).....	9
Figura 2.5 – Sistema de distribuição de Gás Natural Liquefeito (Shively, Ferrare, Petty, 2010).....	9
Figura 2.6 – Esquematização do processo de liquefação do Gás Natural (Shively, Ferrare, Petty, 2010).....	10
Figura 2.7 - Principais tipos de eventos em indústrias de hidrocarbonetos (Crowl e Louvar, 2010).....	15
Figura 3.1a – Ocorrência do evento de BLEVE em esfera de armazenamento de produto inflamável.....	22
Figura 3.1b – Ocorrência de Bola de Fogo em esfera de armazenamento de produto inflamável.....	22
Figura 3.2 – Ocorrência do Fenômeno Bola de Fogo após uma explosão de BLEVE (Schmitt, 2009).....	29
Figura 4.1 - Unidade de armazenamento de LPG, Feyzin (França) (Ozunu, Turcu, Ajtai, Török, 2010).....	39
Figura 4.2 - Operação de amostragem (IChemE, 1987).....	39
Figura 4.3 - Parque da REDUC destruído após seqüência de explosões (PUIATTI, 2011 apud Lione, Villaça, Aguiar, 2011).....	43
Figura 5.1 – Sumário de Texto simulação 1.....	46
Figura 5.2 – Curvas de Vulnerabilidade da Simulação 1.....	47
Figura 5.3 – Sumário de Texto simulação 2.....	48
Figura 5.4 – Curvas de Vulnerabilidade da Simulação 2.....	49
Figura 5.5 – Sumário de Texto simulação 3.....	50
Figura 5.6 – Curvas de Vulnerabilidade da Simulação 3.....	51

Figura 5.7 – Sumário de Texto simulação 4.....	52
Figura 5.8 – Curvas de Vulnerabilidade da Simulação 4.....	53
Figura 5.9 – Sumário de Texto simulação 5.....	54
Figura 5.10 – Curvas de Vulnerabilidade da Simulação 5.....	55
Figura 5.11 – Sumário de Texto simulação 6.....	56
Figura 5.12 – Curvas de Vulnerabilidade da Simulação 6.....	57
Figura 5.13 – Sumário de Texto simulação 7.....	58
Figura 5.14 – Curvas de Vulnerabilidade da Simulação 7.....	59
Figura 5.15 – Sumário de Texto simulação 8.....	60
Figura 5.16 – Curvas de Vulnerabilidade da Simulação 8.....	61

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Composição molar média dos gases pelo tipo de obtenção (Maximo, 2005).....	4
Tabela 2.2 - Listagem de Técnicas de Análise de risco de acordo com o ciclo de vida da Planta (Maia e Borba, 2012).....	17
Tabela 3.1 - Dados de danos a pessoas e estruturas (Schmitt, 2009).....	23
Tabela 3.2 - Relação entre fluxo térmico e seu efeito em pessoas (Schmitt, 2009).....	24
Tabela 3.3 - Consequências da radiação térmica e sobrepressão de um BLEVE (Schmitt, 2009).....	25
Tabela 3.4 - Frequência de eventos causadores de BLEVE (Abbasi e Abbasi, 2006).....	26
Tabela 3.5 – Metodologias empíricas e analíticas para estimação de diâmetro e duração de Bola de Fogo (Abbasi e Abbasi, 2006).....	31
Tabela 3.6 - Correlações para estimação da altura do centro da Bola de Fogo em relação ao nível do solo (Abbasi e Abbasi, 2006).....	31
Tabela 3.7 - Modelos e estimativas para a fração de calor irradiado pela Bola de Fogo (Abbasi e Abbasi, 2006).....	32
Tabela 3.8 - Modelos e estimativas de poder de emissividade de superfície e incidência de radiação em objetos referência (Abbasi e Abbasi, 2006).....	32
Tabela 3.9 – Correlações para fator de visão (Abbasi e Abbasi, 2006).....	33
Tabela 3.10 – Expressões para transmissividade atmosférica (Abbasi e Abbasi, 2006).....	33
Tabela 4.1 - Acidentes importantes envolvendo ocorrência de BLEVE (Haddad, 2011 e de Abbasi e Abbasi, 2006).....	36
Tabela 5.1 – Resultados das simulações de BLEVE.....	62

Capítulo 1

Introdução

A sociedade moderna necessita de quantidades crescentes de energia, seja para produzir, para se locomover ou até para o lazer. Dentre as principais fontes energéticas atualmente em uso encontra-se o gás natural. A demanda deste vem apresentando aumento significativo ao longo dos últimos anos, graças ao seu alto rendimento, baixo custo e pequena geração de poluentes, quando comparado com outras opções.

Para suprir essa demanda energética mundial e garantir flexibilidade na distribuição em todos os pontos do planeta, o transporte do gás natural na sua forma liquefeita pode ser uma opção economicamente interessante. Em um mesmo volume é possível transportar uma maior massa de gás natural na sua forma liquefeita (GNL - Gás Natural Liquefeito) do que no estado gasoso. Obtém-se assim uma maior eficiência no transporte de grandes quantidades em longas distâncias. A exportação de GNL entre continentes é atualmente uma realidade. Deste modo, o número de terminais de estocagem e regaseificação de GNL tende a aumentar significativamente nos próximos anos. Obviamente, aliado a este desenvolvimento, cresce também a necessidade por medidas de segurança e prevenção de acidentes. O conhecimento prévio sobre os possíveis perigos e riscos envolvidos no processo de manipulação e armazenagem de GNL torna-se fundamental para

uma operação segura. A análise das consequências de possíveis cenários acidentais é, portanto, de indispensável notoriedade.

Nos últimos trinta anos a segurança de processos tem ganhado destaque no mundo, e hoje se faz presente como peça fundamental nos projetos industriais. Dentro deste cenário, e respaldado por uma sequência histórica de acidentes severos, o presente estudo foi proposto com objetivo de analisar a fenomenologia de um evento grave observado em acidentes envolvendo reservatórios de GNL: o BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion). O BLEVE é explosão do vapor do líquido em ebulição.

1.1. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo abrangendo a modelagem fenomenológica do BLEVE em tanques de armazenamento de GNL. Um estudo de caso final apresenta comparações entre os cenários de BLEVE envolvendo vasos longitudinais e reservatórios esféricos.

1.2. Organização

No Capítulo 2 encontra-se a contextualização do estudo e alguns conceitos fundamentais. No Capítulo 3 encontra-se o estudo fenomenológico do BLEVE. Inúmeros casos reais de acidentes nos quais observa-se a formação de BLEVE são descritos no Capítulo 4. No Capítulo 5 foi realizado um estudo de caso sobre BLEVE, onde são modelados quatro cenários para esferas e tanques de armazenagem. Finalmente, no Capítulo 6, são descritas as conclusões obtidas, considerações finais e propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Contextualização

2.1. Gás Natural

O Gás Natural (GN) é definido como: *“Gás Natural ou Gás é todo hidrocarboneto que permaneça em estado gasoso nas condições atmosféricas normais, extraído diretamente a partir de reservatórios petrolíferos ou gasíferos, incluindo gases úmidos, secos, e gases raros.”* (LEI-N 9.478/97 apud Maximo/2005)

Segundo Maximo (2005), a composição do GN pode variar, dependendo de ser extraído associado ou não ao petróleo. É composto principalmente de gás metano, etano, passando pelas frações intermediárias e alcançando frações mais pesadas. Normalmente apresenta baixos teores de contaminantes (Tabela 2.1).

Tabela 2.1- Composição molar média dos gases pelo tipo de obtenção

Fonte: Adaptado de Maximo (2005)

Elementos	Obtenção Associada – Fração(%)	Obtenção Não Associada- Fração(%)
Metano	65,18	85,48
Etano	11,11	8,26
Propano	4,82	3,06
I-Butano	0,57	0,47
I-Pentano	0,16	0,85
N-Pentano	0,20	0,24
Hexano	0,06	0,21
Heptano e Superiores	0,09	0,06
Nitrogênio	16,52	0,55
Dióxido de Carbono	0,13	0,64
Total	100	100

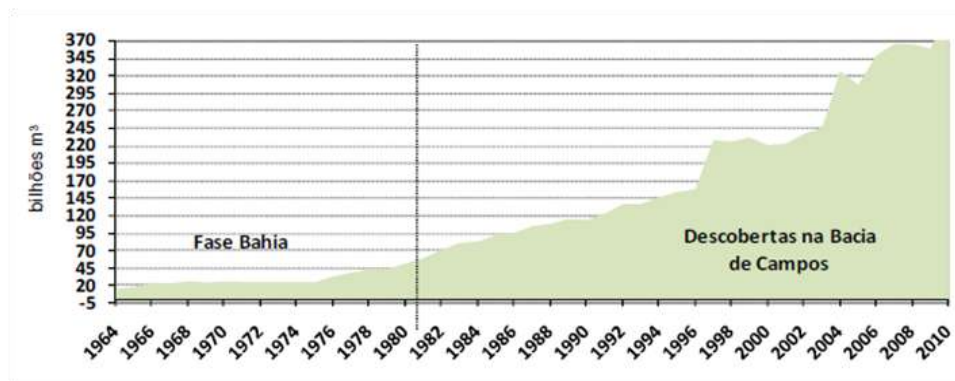
O GN dissipa-se na atmosfera facilmente, sendo mais leve que o ar. É incolor e inodoro, além de apresentar chama quase que imperceptível quando em combustão. Para elevar a segurança do usuário final, o GN é comercializado apenas depois de tratado com compostos de enxofre, de modo que seja facilmente detectável através de seu odor característico. (Máximo, 2005)

Os recursos ou reservas onde se encontra o GN são avaliadas e caracterizadas de acordo com as informações de geociências, de engenharia e de natureza econômica. Assim são classificadas como (ANP/2011):

- Reservas Provadas – são aquelas que, com base na análise de dados geológicos e de engenharia, se estima recuperar comercialmente com elevado grau de certeza;

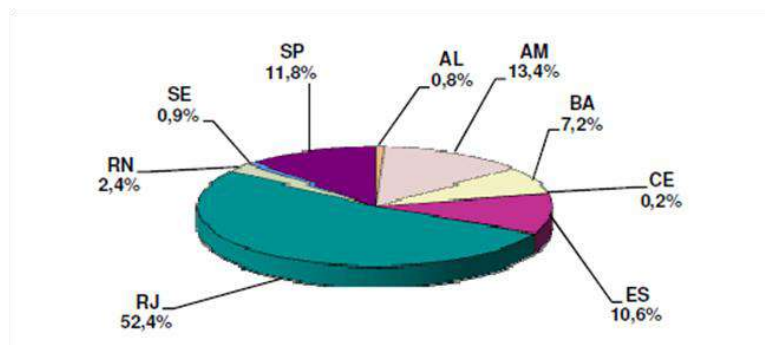
- Reservas Prováveis – são aquelas cuja análise dos dados geológicos e de engenharia indica uma maior incerteza na sua recuperação quando comparada com reservas provadas;
- Reservas Possíveis – são aquelas cuja análise dos dados geológicos e de engenharia indica uma maior incerteza na sua recuperação quando comparadas com a estimativa de reservas prováveis;
- Reservas Totais – representa o somatório das reservas provadas, prováveis e possíveis.

É importante observar que o aumento do número de reservas totais de GN acompanha o crescimento do número de reservas de petróleo. Isso ocorre devido ao caráter associado do gás. Contudo, inúmeras novas reservas de gás não-associado tem sido encontradas. As Figuras 2.1 e 2.2 apresentam, respectivamente, o crescimento das reservas provadas no território brasileiro e a forma como essas reservas encontram-se distribuídas.



Fonte: ANP, 2011

Figura 2.1 - Reservas Provadas de Gás Natural no território brasileiro de 1965 à 2010

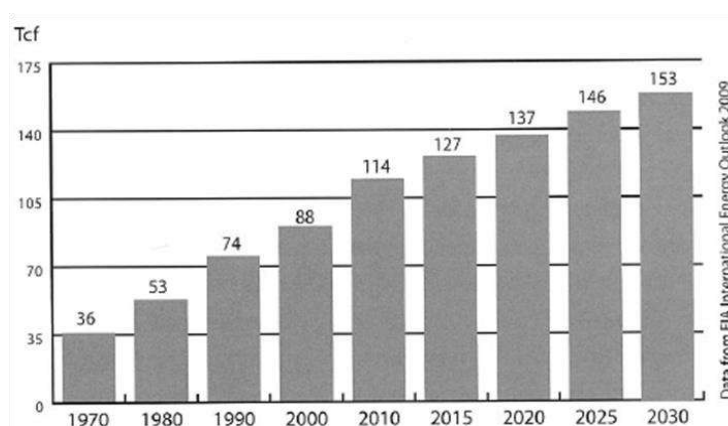


Fonte: ANP/2011

Figura 2.2 - Distribuição percentual das reservas provadas de gás natural no território nacional em 2010

Dentro do cenário ambiental atual, a demanda por combustíveis mais limpos tem instigado o investimento em tecnologias que utilizem o GN devido às vantagens ambientais em sua utilização. Até a década de 70 tais investimentos não eram considerados, já que o Gás Natural era tratado como um produto inferior ou subproduto. Essa visão somente se alterou após as duas crises internacionais causadas por bruscas elevações no preço do petróleo. As crises geraram a necessidade por alternativas para compor a matriz energética (Maximo, 2005). As questões ambientais se juntam as necessidades econômicas e estratégicas envolvendo a diversificação da matriz energética nacional.

A evolução no crescimento do uso do gás tanto em âmbito residencial como no industrial é demonstrada pela Figura 2.3.



Fonte: Shively, Ferrare, Petty, 2010

Figura 2.3 - Consumo de gás natural no mundo

A principal vantagem do uso do GN é sua melhor adequação as normas ambientais existentes. Isso porque, apresenta combustão limpa, não necessitando de tratamento de resíduos ou de produtos pós-queima. O uso de GN então ajuda a diminuir os níveis de poluição.

Segundo o Relatório de Sustentabilidade 2012 da Petrobrás, a oferta de Gás Natural no Brasil atingiu 74,9 milhões de metros cúbicos por dia, superando em 22% a do ano de 2011. Essa elevação na oferta veio para atender a maior demanda das termelétricas, acionadas em função dos baixos níveis dos reservatórios hidrelétricos. A tendência é que o comércio de GN aumente ainda mais nos próximos anos, em função de inúmeros projetos em andamento, como a conclusão do Gasoduto Gasfor II em Fortaleza – CE, o aumento da capacidade de processamento do gás do Sistema Tecab-Reduc, Terminal de Cabiúnas – Refinaria Duque de Caxias, entre outros. Isso tudo foi possível graças aos investimentos feitos no setor de Gás e Energia que somados atingem 4 bilhões de reais. Em vários aspectos o uso de gases combustíveis na geração de eletricidade vem promovendo resultados satisfatórios, na medida em que supre a demanda nos momentos de crise hidroelétrica. (Petrobrás, 2012)

2.2. Gás Natural Liquefeito

2.2.1. Definição

Nas condições normais de temperatura e pressão o gás natural assume a forma gasosa. O transporte de grandes volumes de GN pode ser realizado de forma econômica através de dutovias, uma estratégia que muitas vezes mostra-se mais adequada do que o uso da forma rodoviária ou naval. No entanto, quando o GN é resfriado a aproximadamente -162°C , este torna-se líquido, passando a ser denominado “gás natural liquefeito” (GNL). O GNL apresenta uma redução de quase 610 vezes em seu volume original. A maior massa transportada em um mesmo volume torna viável o transporte naval, por exemplo. (Shively, Ferrare, Petty, 2010)

O GNL é mais pesado que o ar e mais leve que a água. O GNL não é tóxico e não deixa rastros após sua dispersão. Do mesmo modo que o GN, o principal componente do GNL é o metano, no entanto apresenta minoritariamente outros componentes como o nitrogênio, etano, propano e traços de hidrocarbonetos mais pesados. O GNL é considerado uma mistura líquida de hidrocarbonetos. (Shively, Ferrare, Petty, 2010)

2.2.2. Logística econômica

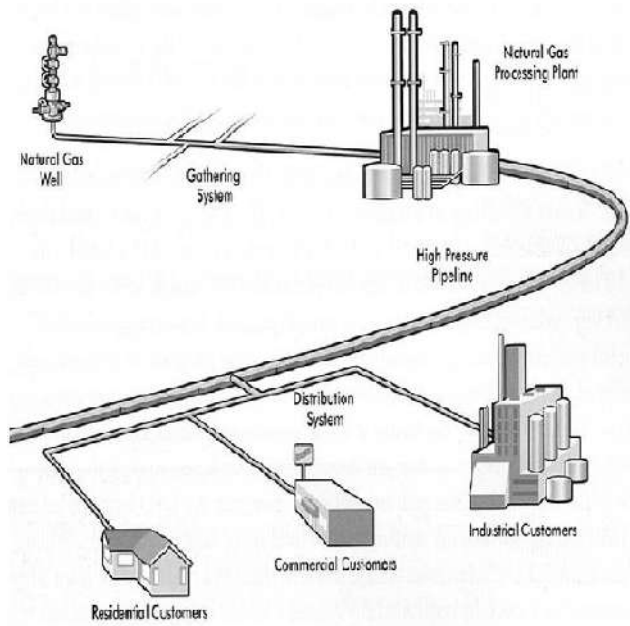
Como apresenta uma considerável redução de volume quando comparado ao Gás Natural, o GNL é economicamente viável de ser transportado em grandes tanques por longas distâncias. É possível assim sua exportação por via marítima entre continentes. (Shively, Ferrare, Petty, 2010)

O GNL apresenta algumas vantagens em relação ao GN, tais como:

- estrutura de transporte mais barata: logísticas navais são mais baratas de construir do que extensas malhas de dutos intercontinentais.
- armazenamento de forma mais fácil e segura, mesma massa armazenada em volumes menores;
- possibilidade dos produtores monetizarem seus ativos. Torna-se viável vender o GNL a locais distantes ou com elevada demanda, mas que não eram acessíveis por não apresentarem malha de dutos.

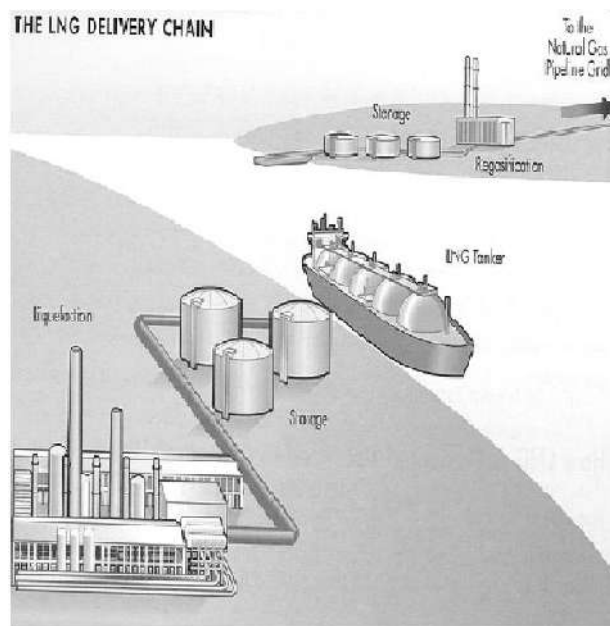
Assim percebe-se que o uso do GNL proporciona diferentes possibilidades de comércio. Porém, gera também a necessidade de nova infraestrutura para sua comercialização. As Figuras 2.4 e 2.5 demonstram essa diferenciação na maneira como é realizado o transporte do GN e do GNL. (Shively, Ferrare, Petty, 2010)

THE NATURAL GAS DELIVERY SYSTEM (WITHOUT LNG)



Fonte: Shively, Ferrare, Petty, 2010

Figura 2.4 - Sistema de distribuição de Gás Natural



Fonte: Shively, Ferrare, Petty, 2010

Figura 2.5 - Sistema de distribuição de Gás Natural Liquefeito

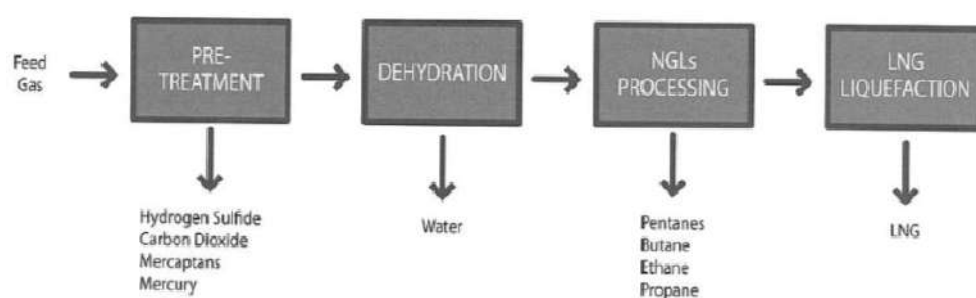
A Figura 2.4 mostra o sistema de distribuição de Gás Natural via uma malha de dutos. O GN origina-se no poço de produção indo para uma unidade

de processamento, responsável por retirar as impurezas e processar o gás. Segue então longas distâncias em dutos de alta pressão, até atingir um sistema de distribuição. Para distribuição o GN é despressurizado e direcionado aos consumidores finais (indústrias, comércios e residências).

Já a Figura 2.5 demonstra a logística do transporte do GNL. Ao sair do poço de exploração, o Gás Natural é direcionado a uma unidade de processamento, seguindo para o processo de liquefação. Obtém-se então o GNL. Este é armazenado em vasos. Os reservatórios devem ter resfriamento criogênico, de modo a manter o gás em um estado líquido. A partir da demanda é feita a transferência do GNL para navios tanque, que transportam a carga até o destino. O GNL pode ser então novamente armazenado, sendo enviado a uma unidade de regaseificação apenas quando necessário. Após ser regaseificado, o combustível está pronto para ser enviado aos consumidores na forma gasosa por meio de dutos.

2.2.3. Etapas de Formação do GNL

A primeira etapa na formação do GNL é a liquefação, onde ocorre o resfriamento do gás natural (Shively, Ferrare, Petty, 2010). O esquema da Figura 2.6 apresenta a sucessão de fases a serem realizadas na liquefação.



Fonte - Shively, Ferrare, Petty, 2010

Figura 2.6 - Sequência típica de processamento do Gás Natural e Liquefação

A primeira fase é dita como pré-tratamento, onde o gás natural vindo da alimentação passa por uma série de processos nos quais são retirados

substâncias ácidas e outras impurezas. Estes componentes poderiam danificar os equipamentos e/ou as tubulações pelas quais o GNL é bombeado, ou mesmo mudar alguma especificação regulamentar do produto final. Após o pré-tratamento passa-se por um processo de desidratação, para retirada da água (Shively, Ferrare, Petty, 2010).

A fase seguinte é dita como a segunda em importância financeira dentro deste processo. É nesta etapa que será processado o Gás Natural para retirada das “fatias” pesadas e da parte líquida já presente. Todos os compostos retirados nessa fase possuem valor de mercado e são considerados tão importantes quanto o GNL.

Como fase final ocorre o processo de resfriamento, onde o gás tratado, principalmente metano, é resfriado até -162°C , sofrendo liquefação. Existem diferentes tipos de processos de resfriamento, os quais não serão abordados no trabalho, no entanto o pressuposto de todos é a troca de calor sequencial, ou seja, trocadores de calor em série com um líquido refrigerante estabelecendo a troca térmica com o gás até que este atinja a temperatura almejada.

2.2.4. Futuro e desafios

Conforme o desenvolvimento tecnológico progride, a sociedade gera uma maior demanda por Gás Natural. Para atender essa demanda em um mercado global o GNL mostra-se uma opção viável tanto em termos logísticos quanto em econômicos. No entanto, devem-se levar em consideração os desafios do próprio negócio. O segmento de gás, como exploração e comercialização, tende a oferecer riscos. Os riscos devem ser compreendidos e gerenciados de forma a oferecer rentabilidade e sustentabilidade. A seguir listam-se alguns desses desafios:

- Infra-estrutura – O GNL depende de uma rede de infra-estrutura maior e mais complexa que o Gás Natural. A construção de unidades de processamento, liquefação, regaseificação e navios tanque para o transporte são de suma importância e necessitam

de projetos confiáveis. Qualquer atraso ou acidente causa prejuízos de larga escala;

- Operacional – Mão-de-obra qualificada e manutenção de equipamentos, uma vez que interrupções, paradas não programadas, perdas na produção ou vazamentos podem gerar riscos físicos e financeiros;
- Logística – Os estoques devem ser avaliados cuidadosamente. A demanda não deve suplantiar a oferta, impedindo a concretização de vendas; assim como a oferta não deve superar a demanda gerando oscilação de preços que tornem inviável a comercialização;
- Gerenciamento de Riscos – A segurança de processos deve sempre estar presente em qualquer etapa, seja de exploração, transporte ou comercialização. Regulamentações e leis cada vez mais rígidas vêm buscando aliar lucratividade e soluções de mínimo risco humano e ambiental. Em virtude do volume estocado, o armazenamento do GNL é uma etapa crítica para a segurança de processos. Cenários de vazamento de gás, incêndio e BLEVE devem ser sempre analisados e quantificados.

2.3. Segurança

A palavra “segurança” em português apresenta sentido amplo e abrangente, incluindo “segurança de processo”, “segurança ocupacional” (segurança do trabalho), “segurança patrimonial”, etc. Neste estudo privilegiou-se a segurança de processos, não abordando-se temas de relevância na área de segurança ocupacional e patrimonial.

De acordo com a CETESB (2011), o cenário industrial atual mostra-se extremamente voltado para a questão da segurança relativa aos processos envolvidos, porém nem sempre foi assim. Os acidentes do passado contribuíram de forma significativa para chamar a atenção das autoridades

governamentais, da indústria e da sociedade como um todo, no sentido de buscar mecanismos para a prevenção de episódios que comprometam a vida de pessoas e a qualidade do meio ambiente.

Metodologias, abordagens e ferramentas já amplamente utilizadas nas indústrias bélica, aeronáutica e nuclear passaram por um processo de adaptação, permitindo seu emprego na análise e avaliação do risco associado às atividades em outros ramos industriais – em especial nas áreas de petróleo, química e petroquímica.

No Brasil análises de risco passaram a ser requeridas para determinados tipos de empreendimentos. Deste modo, além dos aspectos relacionados aos impactos ambientais e à poluição, também a prevenção de acidentes ampliados, aqueles que afetam a população externa a instalação industrial, foi contemplada no processo de licenciamento.

O conhecimento do risco imposto pelo empreendimento ao ambiente externo, ou seja, populações e meio ambiente, aperfeiçoa a adoção de medidas de gerenciamento eventualmente necessárias.

Tradicionalmente diferentes cenários acidentais são tratados separadamente, possibilitando seu estudo detalhado e simulação matemática quantitativa quando necessária. Embora essa abordagem torne a análise viável, estudos realizados separadamente podem apresentar limitações na interpretação dos seus resultados, levando à subestimação do risco e à proposição de medidas de gerenciamento eventualmente insuficientes. A título de exemplo, pode-se imaginar um grupo de pessoas presentes na região de abrangência de cenários acidentais de duas plantas do mesmo empreendimento. Caso os estudos de risco das plantas sejam realizados de forma independente, ter-se-ão duas estimativas do risco imposto ao citado grupo, cada qual proveniente de um estudo. A correta expressão do risco imposto pelo empreendimento ao grupo dependerá da integração dos estudos, tarefa nem sempre de realização imediata e consistente tecnicamente. Realizar o estudo do empreendimento como um todo, e não apenas de uma planta ou de uma instalação do mesmo, pode trazer vantagens, pois possibilita conhecer o risco efetivamente imposto. (CETESB, 2011)

Apesar de todos os esforços realizados, como o aprimoramento das normas e legislações, desenvolvimento de ferramentas e técnicas de análise e gerenciamento do risco, acidentes podem ocorrer. E tais acidentes podem, eventualmente, resultar em danos as instalações, as comunidades vizinhas e ao meio ambiente. Desta forma, um estudo aprofundado das consequências é fundamental para a correta estimativa do risco.

2.3.1. Introdução a Segurança de Processos

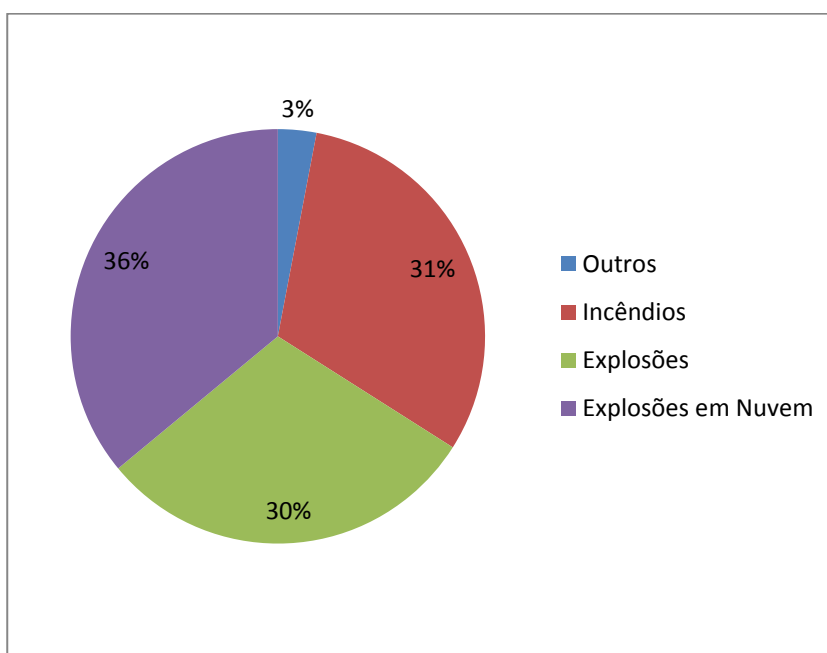
Conforme o desenvolvimento tecnológico avança, os processos tornam-se mais complexos, o que gera necessidade de um maior detalhamento e entendimento na área de segurança. Assim, certos conceitos são fundamentais, como os a seguir retirados de Crowl e Louvar, 2010.

- Segurança de Processos ou Prevenção de Perdas – Prevenção de acidentes através de tecnologias apropriadas para identificação de riscos e eliminação ou redução dos mesmos antes que um acidente ocorra;
- Perigo – Condição física ou química que apresente potencial para causar danos a pessoas, propriedades e/ou o meio ambiente;
- Risco – Trata-se do produto da probabilidade de um acidente ocorrer e da magnitude da perda ou dano por este causado;
- Incidente – Perda ou falha nas medidas de contenção de um material ou de energia. Nem todo incidente sofre propagação para acidente;
- Acidente – Ocorrência de uma sequência de eventos que geram danos e mortes. O termo acidente refere-se ao evento, não a ocorrência do evento;
- Cenário – Descrição dos eventos que resultaram em um acidente ou em um incidente. Esta descrição deve conter informações relevantes, que permitam levar até a causa raiz;

- Análise do risco – O desenvolvimento de uma estimativa do risco baseada em técnicas matemáticas e avaliações de engenharia, que combinam estimativas de consequências e frequências;
- Avaliação do risco – O processo pelo qual os resultados da análise de risco são utilizados no intuito de tomar decisões quanto as estratégias que serão utilizadas para redução do risco obtido.

2.3.2. Caracterização de Acidentes

Por mais que existam progressos tecnológicos e os processos químicos evoluam, as consequências dos acidentes tendem a seguir padrões típicos ou pelo menos ocorrer de forma semelhante. A Figura 2.7 revela que 97% das consequências acidentais são enquadradas em apenas três diferentes classes.



Fonte: Crowl e Louvar,2010

Figura 2.7 - Principais tipos de eventos em indústrias de hidrocarbonetos

Além das consequências pode-se tentar identificar também as diferentes causas dos eventos ocorridos. Neste caso pode-se perceber uma gama de diferentes situações. Embora diferentes cenários apresentem consequências similares ou iguais, são gerados de formas diferentes. Segundo Crowl e Louvar(2010), a principal causa para eventos ocorrerem é o denominado “erro humano”, estando ligado a 70% e 80% dos eventos iniciadores. Destacam-se ainda “falha mecânica”, “erro operacional” e “erros de projeto”. Somado a estes se devem ressaltar eventos originados por causas naturais, como furacões e maremotos.

Deve-se ressaltar que nenhuma forma de controle ou planejamento é a prova de falhas. Destaca-se ainda que existem acidentes com causas desconhecidas, mesmo após terem sido realizados estudos para resolução dos acontecimentos. Assim sendo, é de extrema importância analisar a confiabilidade e veracidade dos dados obtidos em qualquer análise de risco, de modo a maximizar a eficiência dos estudos propostos e proporcionar sempre a análise mais confiável possível.

2.3.3. Gerenciamento de Riscos

A necessidade de gerenciar riscos decorre, principalmente, da consciência de existência de fatores internos ou externos ao projeto cujo desencadeamento, ao longo do seu ciclo de vida, pode promover cenários acidentais. A identificação desses fatores e de suas causas constitui uma das etapas fundamentais de qualquer metodologia de gestão de riscos. O tipo de risco, a sua probabilidade de ocorrência e consequência variam ao longo do ciclo de vida da instalação industrial. Por isso é necessário proceder-se à identificação dos riscos em todas as fases, como mostra a Tabela 2.2 (Maia e Borba, 2012).

Tabela 2.2 – Listagem de Técnicas de Análise de risco de acordo com o ciclo de vida da Planta

Fonte: Adaptado de Maia e Borba, 2012

	Projeto Conceitual (FASE 2)	Projeto Básico (FASE 3)	Projeto de Detalhamento	Construção e Montagem	Comissionamento/ Pré-Operação	Operação	Desativação
Lista de Verificação					X		X
APR	X	X	X	X (APP de Serviço)		X	X
HAZOP		X	X			X	
LOPA		X	X			X	
Análise de Conseqüências		X	X			X	
AQR		X	X			X	

APR – Análise preliminar de riscos; HAZOP – Estudo de operabilidade e riscos; LOPA – Análise das camadas de proteção; AQR – Análise quantitativa de riscos

Diferentes técnicas de análise de riscos estão atualmente disponíveis. A escolha de uma técnica ou outra é função de uma série de particularidades, inclusive da fase em que o projeto se encontra. A Tabela 2.2 ilustra o uso de diferentes técnicas para diferentes fases do projeto.

Após a caracterização é realizada uma análise dos riscos, baseada na frequência com que o evento pode ocorrer e nas conseqüências geradas. As frequências variam de acordo com a base de dados empregada, não sendo abordadas neste trabalho. As conseqüências podem ser avaliadas através de

simulações matemáticas baseadas em modelos fenomenológicos, conforme será desenvolvido neste trabalho.

2.3.4. Mapeamento dos efeitos físicos

Sendo “risco” o produto da frequência pela severidade, riscos são diretamente proporcionais as consequências dos eventos gerados. Dessa forma, essas consequências tornam-se objeto de estudos qualitativos e quantitativos com o objetivo de estimar corretamente o risco. Através das simulações é possível entender melhor os cenários acidentais, como eles ocorrem, quais as suas magnitudes, como ocorre sua propagação, até onde vai o alcance de seus efeitos danosos, etc.

Assim sendo é possível identificar e separar consequências similares entre si, dentro de grupos que apresentam as mesmas características. Foi realizado um mapeamento dos efeitos físicos que poderiam ser gerados pelos eventos ocorridos. A lista a seguir mostra a segregação dos efeitos, e denota as principais consequências encontradas:

- Radiação Térmica – Incêndio em Poça, Jato de Fogo ou Tocha, Bola de Fogo, Incêndio em Nuvem;
- Intoxicação – Nuvem tóxica;
- Contaminação Ambiental – Contaminação de ecossistemas e poluição atmosférica;
- Sobrepressão – Explosão em nuvem de vapor; Explosão confinada; BLEVE.

Cenários acidentais envolvendo vasos de GNL podem apresentar todas as consequências acima listadas. Neste trabalho foi escolhido o fenômeno de BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) para realização de um estudo completo sobre sua morfologia e modelagem. Essa escolha se deu devido à alta frequência de ocorrência do mesmo no passado recente e do intenso poder destrutivo que o evento gera. Estas dois fatores estão discutidos nos capítulos seguintes, que trataram da morfologia e modelagem do BLEVE, assim como uma breve análise histórica.

2.4. ALOHA Software (NOAA/EPA)

ALOHA (Area Locations of Hazardous Atmospheres) é um programa computacional desenvolvido pela NOAA/EPA para simular matematicamente as consequências de possíveis acidentes envolvendo substâncias químicas e/ou inflamáveis. O programa simula diferentes cenários, tais como dispersão atmosférica, formação de nuvens tóxicas e inflamáveis, explosões e BLEVE.

O software pode ser usado no desenvolvimento de planos de resposta a emergências e treinamentos de emergência. O ALOHA foi desenvolvido pela NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) e pela EPA (Environmental Protection Agency) encontrando-se disponível para download gratuito.

Embora simples a ferramenta possibilita a modelagem de diferentes cenários acidentais de interesse. O ALOHA apresenta uma biblioteca com as propriedades físico-químicas de aproximadamente 1000 substâncias químicas puras. O programa não simula misturas de componente. Esta é uma das suas principais limitações (ALOHA's Manual, 2007).

Capítulo 3

O Fenômeno do BLEVE

3.1. Introdução

Ao longo de toda a história da industrialização, em especial do desenvolvimento do setor químico, petroquímico e de petróleo, ocorreu um grande número de eventos acidentais cujas consequências foram desastrosas, afetando a sociedade como um todo e afetando a imagem destes setores. Desta forma, mostrou-se fundamental a implementação de regras, procedimentos e normas com o intuito de aumentar a segurança de processos. Programas como o AR (atuação responsável) desenvolvido pela ABIQUIM, passou a ser etapa fundamental para a manutenção e crescimento do setor.

Cenários acidentais envolvendo plantas químicas frequentemente ocasionam situações de vazamento de substâncias tóxicas, corrosivas, oxidantes ou inflamáveis. A ocorrência de vazamento pode originar incêndios, quando o material liberado é inflamável. Incêndios em nuvem ou em poça

podem ocorrer, algumas vezes acompanhados de explosões. A ocorrência de BLEVE, com explosão do vaso, é um cenário extremamente severo e demanda maior atenção.

Segundo Abbasi e Abbasi (2008), o termo BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion), foi utilizado pela primeira vez em 1957 por J. B. Smith, W. S. Marsh e W. A. Walls. Estes estavam entre os presentes no dia 24 de Abril de 1957, quando um vaso usado para produzir resina fenólica fragmentou-se em diversos pedaços subitamente. Não houve qualquer tipo de incêndio, já que o conteúdo do vaso era praticamente não inflamável. No entanto os danos causados pelos fragmentos projetados, e em menor escala pelas ondas de choque e sobrepressão, foram relevantes. O trio realizou uma análise do evento. Apurando os fatos concluiu que a causa da explosão fora uma combinação entre “líquido em ebulição” e “vapor em expansão”. Daí apareceu o acrônimo BLEVE. O evento de BLEVE descrito acima é atualmente conhecido como “BLEVE a frio”. Quando a explosão do vaso está relacionada a um incêndio externo ao mesmo, denomina-se “BLEVE a quente”. Este será o foco deste estudo.

A definição de BLEVE varia levemente entre diferentes autores. Aqui se optou por adotar a definição de Haddad (2011), que estabelece o evento de BLEVE como sendo um fenômeno físico resultante da liberação repentina de um líquido mantido a temperatura acima do seu ponto de ebulição na pressão atmosférica (líquido superaquecido). O súbito decréscimo de pressão com o rompimento do vaso resulta na violenta vaporização de uma fração do líquido, e na formação de uma nuvem de vapor e gotículas que podem ultrapassar 200 vezes o volume inicial. A descompressão é suficiente para gerar de ondas de pressão e lançar fragmentos.

Assim definido, o evento de BLEVE pode ocorrer com qualquer vaso, esteja ele armazenando substância inflamável ou não. Contudo existem particularidades quanto as consequências de um BLEVE envolvendo líquido inflamável ou combustível. Neste caso, se houver uma fonte de ignição próxima o suficiente, haverá formação de uma Bola de Fogo (Fireball), cujos efeitos de

liberação térmica podem ser mais perigosos do que o BLEVE em si. (Haddad, 2011)

As Figuras 3.1a e 3.1b ilustram um exemplo de BLEVE a quente, onde existe um incêndio externo estabelecido na parte inferior do vaso. O incêndio de longa duração acaba por promover o BLEVE do tanque. Na sequência ocorre a formação de uma enorme Bola de Fogo.



Figura 3.1a – Ocorrência do evento de BLEVE esfera de armazenamento de produto inflamável

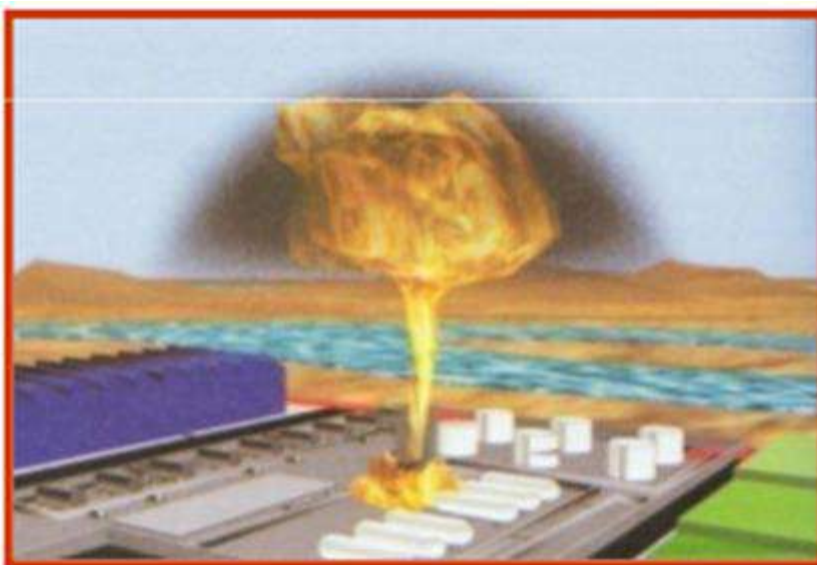


Figura 3.1b – Ocorrência de Bola de Fogo em esfera de armazenamento de produto inflamável

Os efeitos gerados por um evento de BLEVE podem apresentar diferentes proporções. De modo geral as consequências são: i. ondas de pressão ou choque; ii. projeção de fragmentos; iii. liberação de radiação térmica devido a formação de Bola de Fogo (se for o caso).

Todas as consequências apresentadas podem ser extremamente severas, destruindo equipamentos e ameaçando a vida. Desta forma, é possível perceber a importância de quantificar os danos a partir deste evento.

As Tabelas 3.1 e 3.2 mostram alguns valores de referência de sobrepressão e fluxo térmico *versus* danos.

Tabela 3.1- Dados de danos a pessoas e estruturas por sobrepressão

Fonte: Adaptado de Schmitt, 2009

Pico de Sobrepressão (KPa)	Impacto
0,14	Ruído incômodo (137 dB)
0,21	Quebra de grandes janelas de vidro tensionadas
0,28	Ruído alto (143 dB), "boom" sônico, quebra de vidros
1,00	Limite mínimo para quebra de vidros
2,00	Distância "segura" (menos de 5% de probabilidade de danos sérios abaixo deste valor). 10% de vidros quebrados
4,00	90% de vidros quebrados. Danos á revestimentos. Dano estrutural pequeno.
7,00	Pedaços de vidros projetados com velocidade capazes de causar ferimentos. Telhas removidas.
14,00	Casa inabitáveis, porém não totalmente irreparáveis. Construções em bloco de cimento achatadas.
21,00	Distorção em estruturas reforçadas. 20% de probabilidade de fatalidades no interior dos prédios.
35,00	Sérios danos estruturais. Demolição de prédios. Tanques grandes de armazenamento podem romper. 15% de fatalidade fora dos prédios e 50% de fatalidade no interior dos mesmos.
70,00	Provável demolição total de todas as estruturas. 99% de probabilidade de fatalidades.

Tabela 3.2 - Relação entre fluxo térmico e seu efeito em pessoas

Fonte: Adaptado de Schmitt, 2009

Fluxo Térmico (KW/m²)	Impacto
1,2	Exposição ao sol no verão ao meio-dia
1,6	Mínimo para sentir dor na pele
4,7	Dor entre 15 a 20 segundos, queimaduras de segundo grau após 30 segundos
12,6	30% de fatalidade por exposição contínua, nível mínimo para derreter tubos de plástico
23	100% de fatalidade por exposição contínua, 10% de fatalidade por exposição instantânea
35	25% de fatalidade por exposição instantânea, danos a equipamentos de processo
60	Quase 100% de fatalidade por exposição instantânea

Segundo Haddad (2011) a ocorrência do evento de BLEVE segue uma série de fatores:

- o produto envolvido é um líquido ou gás liquefeito
- o recipiente utilizado para armazenamento é fechado (tambor, tanque, esfera, cilindro);
- a temperatura do líquido é maior que a sua temperatura de ebulição à pressão atmosférica;
- ocorre falha do recipiente que pode ser ocasionada pela presença de fogo nas imediações, fraqueza estrutural, falha da válvula de segurança, impacto, etc;

O último item lista as causas diretas de ocorrência do BLEVE, respeitadas as condições dos itens anteriores. Observando este último item é possível dividir o BLEVE em duas categorias: “BLEVE a frio” e “a quente”.

O BLEVE a FRIO é gerado a partir de impactos físicos e/ou falhas estruturais, não estando relacionado a presença de fogo nas proximidades do vaso. Já o denominado BLEVE a QUENTE é gerado a partir do aquecimento do vaso por contato com fogo externo ao mesmo. O incêndio aquece a

estrutura, reduzindo sua integridade física até o ponto em que ocorre o colapso. A Tabela 3.3 demonstra a diferença na proporção dos danos entre um BLEVE a QUENTE e um BLEVE a FRIO de um tanque de propano. Pode-se constatar que os danos ocasionados pelo evento a QUENTE tem intensidade maior. (Schmitt, 2009)

Tabela 3.3 - Conseqüências da radiação térmica e sobrepressão de um BLEVE

Fonte: Adaptado de Schmitt, 2009

Conseqüências de um BLEVE	Distância máxima de alcance em metros			
	Tanque de 60 m ³		Tanque de 110 m ³	
	BLEVE FRIO	BLEVE QUENTE	BLEVE FRIO	BLEVE QUENTE
Colapso de prédios	35	50	40	55
Danos severos a prédios	50	70	60	85
100% de fatalidades	90	150	110	190
Ignição de prédios	200	270	250	350
1% de fatalidades	220	310	310	410
Queimaduras de 1º grau e vidros quebrados	400	500	500	700

3.2. Mecanismo do BLEVE

A partir de relatos históricos é possível compreender a sequência de fatos que rege a maioria dos BLEVEs. Sequência do evento de BLEVE segundo Abbasi e Abbasi (2006):

1º - Um recipiente contendo um gás liquefeito pressurizado apresenta perda de resistência devido a calor externo, projeção de fragmentos, fadiga ou corrosão.

No cenário de BLEVE A QUENTE o vaso contendo gás liquefeito, ou seja, um líquido confinado em uma temperatura muito maior que seu ponto de ebulição em condições atmosféricas, começa a receber calor de uma fonte externa. O calor eleva a temperatura do conteúdo e por consequência a pressão interna do recipiente. A pressão interna se eleva até atingir o “set” de abertura da válvula de alívio, acionando-a. Conforme o vapor do líquido é

liberado pela válvula de alívio, no intuito de baixar a pressão interna, o nível de líquido dentro do vaso também cai. O líquido age como agente de resfriamento do costado do tanque, transferindo calor de forma eficiente e evitando que o costado tenha sua temperatura muito elevada pelo incêndio externo. A medida que o nível de líquido cai, as paredes do recipiente que estavam sendo resfriadas pela fase líquida começam a não trocar calor de forma tão efetiva, pois agora estão em contato apenas com o vapor localizado no interior do vaso. A menor eficiência de troca térmica eleva a temperatura do costado. A alta temperatura e a elevada pressão interna fragilizam o costado, até que este se rompa.

No caso de BLEVE A FRIO as falhas estruturais podem ocorrer de formas distintas, como por exemplo, por projeção de fragmentos de outros recipientes que sofram eventos explosivos. A perfuração por fragmentos de tanques vizinhos promove sucessivas explosões, em um efeito cascata que pode arrasar toda a área de tancagem. Também podem ocorrer devido a falhas mecânicas ou de manutenção, como por exemplo, falha de soldas.

A Tabela 3.4 caracteriza a frequência dos eventos iniciadores dos maiores acidentes de BLEVE até o ano de 2004.

Tabela 3.4 - Frequência de eventos causadores de BLEVE

Fonte: Adaptado de Abbasi e Abbasi, 2006

Incêndio	36%
Dano mecânico	22%
Superenchimento	20%
Reações em cadeia	12%
Superaquecimento	6%
Contaminação de vapor	2%
Falha mecânica	2%

2º - Ocorrência de despressurização instantânea e consequente explosão.

Logo após a ruptura do recipiente ocorre uma imediata despressurização do conteúdo. O material é submetido a uma pressão consideravelmente menor (pressão atmosférica). No entanto, apresenta uma temperatura muito acima do seu ponto de ebulição para esta nova condição de pressão – o líquido fica em um estado de superaquecimento. Neste momento ocorrerá o “flash” de uma grande fração do líquido, o que gera uma expansão violenta.

3º - O recipiente é totalmente fragmentado.

O súbito “flasheamento” do líquido e a expansão do vapor, proporciona um aumento de volume. Desta forma é gerada uma intensa onda de choque e sobrepressão, que fragmenta o casco do vaso. Os fragmentos do recipiente são projetados a partir da explosão, assim como uma parcela do líquido. Ocorre então lançamento de fragmentos de tanque e gotículas de combustível sobre pessoas e equipamentos vizinhos. No caso do líquido ser inflamável, o vapor e as gotículas podem entrar em ignição produzindo uma imensa bola de fogo. Os fragmentos são lançados com velocidade, usualmente acarretando danos e possivelmente outros BLEVEs.

Em termos comparativos, a onda de choque gerada no BLEVE é muito maior do que a gerada por um evento de Explosão em Nuvem de Vapor (VCE em inglês) com a mesma quantidade de material combustível (Abbasi e Abbasi, 2006).

O tempo gasto desde o início da falha estrutural do vaso até o momento de explosão varia de caso a caso. Desta forma a partir de estudos de casos de BLEVE é possível prever apenas um tempo médio de duração do processo, que se encontra na faixa entre 5 e 30 minutos contado a partir do evento iniciador (Abbasi e Abbasi, 2006).

4º - Consequências pós-explosão.

No caso da substância contida no vaso ser inflamável, a mistura líquido /gás/vapor e ar pode sofrer ignição. Isso gera a bola de fogo (fireball). Neste caso as consequências são ainda maiores, especialmente em termos de danos

as pessoas, devido a intensa radiação térmica produzida. As características da bola de fogo dependem de inúmeras variáveis. Caso o material armazenado seja tóxico, apresenta formação de nuvem tóxica.

3.3. Impacto ou Consequências do BLEVE

Conforme explicado, a ocorrência do evento BLEVE acarreta duas grandes consequências: sobrepressão e radiação térmica caso o material seja inflamável.

Segundo Abbasi e Abbasi (2006), o fator determinante para prever a severidade das ondas de choque, poder de penetração e distância percorrida pelos fragmentos projetados, é a Energia de Explosão. Por outro lado, para definir a severidade da Bola de Fogo suas características devem ser estimadas, tais como tempo de duração, tamanho máximo, temperatura de queima e fluxo de calor radiante.

Neste projeto estimou-se a severidade de BLEVEs em tanques de armazenamento de GNL. Assim, por tratar-se de um material inflamável, foi suposta a formação de bola de fogo. Este estudo foca apenas na emissão de radiação térmica ocorrida a partir formação da bola de fogo formada, não avaliando os danos causados por sobrepressão. Modelagem para sobrepressão encontra-se disponível em Abbasi e Abbasi (2006) e Schmitt (2009).

3.3.1. Radiação Térmica

Conforme descrito, quando o evento de BLEVE ocorre em um vaso de armazenamento de líquido inflamável ou combustível, imediatamente após a explosão pode ocorrer a formação de uma Bola de Fogo (Fireball), como apresentado na Figura 3.2. Por esta razão muitas vezes relaciona-se a Bola de Fogo com o BLEVE, o que não é verdade. Observa-se na Tabela 4.1 que o evento de BLEVE ocorre com certa frequência em tanques com materiais não-inflamáveis, não apresentando ocorrência de Bola de Fogo.

No caso de interesse neste estudo, envolvendo BLEVE em tanques de GNL, ocorre a formação de bola de fogo.



Figura 3.2 – Ocorrência do Fenômeno Bola de Fogo após uma explosão de BLEVE

Fonte: Schmitt/ 2009

Segundo Abbasi e Abbasi (2006), a dinâmica da Bola de Fogo discorre em três fases distintas:

1ª - Crescimento: Esta fase pode ser separada em dois momentos. No primeiro a Bola de Fogo cresce até aproximadamente metade do seu diâmetro final, sua superfície é brilhante, apresentando chamas amarelo-esbranquecidas. A temperatura é de aproximadamente 1300° C. No segundo momento a bola de fogo sofre expansão até seu volume máximo. Sua coloração muda, cerca de 10% da superfície escurece e o restante apresenta cores como laranja-amarelado, vermelho-claro e branca, indicando temperaturas de chama um pouco menores, na faixa de 1100 a 1200°C.

2ª - Queima contínua: Neste momento o formato da bola de fogo já é basicamente o de uma esfera. Encontra-se no seu tamanho máximo. O crescimento acaba com o típico formato de cogumelo. Esta fase dura cerca de

10 a 15 segundos. A temperatura das chamas permanece na faixa de 1100 a 1200°C.

3ª - Apaziguamento: A bola de fogo se dilui no ar, as chamas mudam de cor tornando-se mais translúcidas

Para estimar a radiação térmica emitida pela bola de fogo é necessário estimar alguns parâmetros fundamentais, como o diâmetro máximo atingido e o tempo de duração. A partir destes dados de origem é possível calcular a radiação que atinge um ponto referência (“alvo”), possibilitando estimar danos a seres humanos ou estruturas no local afetado.

3.3.2. Modelagem da Radiação Térmica

De forma a realizar uma análise de risco mais precisas, capaz de prever cenários adversos e possibilitar o desenvolvimento de planos de ação, a modelagem matemática foi proposta para descrever a formação de bolas de fogo. A partir de dados experimentais e modelos fenomenológicos foi possível estabelecer relações matemáticas, modelos de cálculo capazes de estimar as variáveis de interesse – em especial a radiação térmica que atinge um alvo. A seguir apresentam-se brevemente alguns modelos matemáticos atualmente disponíveis na literatura.

A Tabela 3.5 apresenta as correlações empregadas para determinar o diâmetro máximo alcançado pela Bola de Fogo, assim como seu tempo de duração.

Após são apresentados modelos para o cálculo da altura que a bola de fogo alcançará (Tabela 3.6). A estimativa da fração de calor irradiada encontra-se na Tabela 3.7. Uma vez estimados tais parâmetros, estes são utilizados para o cálculo da emissividade, ou seja, o poder emissivo da bola de fogo e da carga térmica, a quantidade de radiação incidida em um ponto referência, com os modelos apresentados na Tabela 3.8.

Para estimar a quantidade de radiação térmica que atinge um alvo é necessário estimar a transmissividade atmosférica e o fator de forma. Equações para ambos os termos constam das Tabelas 3.9 e 3.10.

A modelagem específica utilizada pelo *software* na realização dos cálculos encontra-se no apêndice.

Tabela 3.5 – Modelos disponíveis para estimação de diâmetro máximo de bola de fogo e sua duração

Fonte: Abbasi e Abbasi, 2006

Source	Material	Diameter, D_{max} (m)	Duration, t_B (s)
Empirical correlations			
Hardee and Lee [116]	Propane	$5.55M^{0.333}$	–
Fay and Lewis [117]	Propane	$6.28M^{0.333}$	$2.53M^{0.167}$
Hasegawa and Sato [118]	Pentane	$5.28M^{0.277}$	$1.10M^{0.097}$
Hasegawa and Sato [119]	<i>n</i> -Pentane	$5.25M^{0.314}$	$1.07M^{0.181}$
Williamson and Mann [120]	–	$5.88M^{0.333}$	$1.09M^{0.167}$
Lihou and Maund [121]	Butane	$5.72M^{0.333}$	$0.45M^{0.333}$
Lihou and Maund [121]	Rocket fuel	$6.20M^{0.320}$	$0.49M^{0.320}$
Lihou and Maund [121]	Propylene	$3.51M^{0.333}$	$0.32M^{0.333}$
Lihou and Maund [121]	Methane	$6.36M^{0.325}$	$2.57M^{0.167}$
Moorhouse and Pritchard [122]	Flammable liquid	$5.33M^{0.327}$	$1.09M^{0.327}$
Lihou and Maund [121]	Propane	$3.46M^{0.333}$	$0.31M^{0.333}$
Duiser [123]	Flammable liquid	$5.45M^{1.30}$	$1.34M^{0.167}$
Marshall [12]	Hydrocarbon	$5.50M^{0.333}$	$0.38M^{0.333}$
Gayle and Bransford [124] and Bagster and Pitblado [125]	Flammable liquid	$6.14M^{0.325}$	$0.41M^{0.340}$
Pietersen [98], CCPS [76], Prugh [105] and TNO [73]	Flammable liquid	$6.48M^{0.325}$	$0.852M^{0.260}$
Robert [104] and CCPS [1]	Flammable liquid	$5.80M^{0.333}$	$0.45M^{0.333}$ ($M < 3 \times 10^4$), $2.60M^{0.167}$ ($M \geq 3 \times 10^4$)
Martinsen and Marx [126]	Flammable liquid	$8.66M^{0.25}t^{0.333}$, $0 \leq t \leq t_B/3$	$0.9M^{0.25}$
Analytical models			
Bader et al. [127]	Propellant	$0.61 \left(\frac{3}{4\beta g} \right)^{1/3} W_b^{1/3}$	$0.572 W_b^{1/6}$
Hardee and Lee [116]	LNG	$6.24M^{0.333}$	$1.11M^{0.167}$
Fay and Lewis [117]	Flammable liquid	$\frac{\beta \rho^2 (\rho_a - \rho_p)}{7\rho_p}$	$t = \left(\frac{14\rho_p}{\beta \rho (\rho_a - \rho_p)} \right)^{0.5} \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{0.167}$

M: mass of fuel in fireball (kg), *t*: time elapsed after BLEVE (s), ρ : density of fireball gas (lb/ft³), W_b : mass of propellant (lb), *g*: acceleration due to gravity (m/s²), β : entrainment coefficient, ρ_a : density of air (kg/m³), ρ_p : density of products of combustion (kg/m³).

Onde: M – massa de combustível na Bola de Fogo (Kg); t – Tempo de duração da Bola de Fogo (s); ρ – densidade do gás da Bola de Fogo (lb/ft³); W_b – massa de explosivo (lb); *g* – aceleração da gravidade (m/s²); β – coeficiente de arrastamento; ρ_a – densidade do ar (Kg/m³); ρ_p – densidade dos produtos da combustão (Kg/m³)

Tabela 3.6 - Correlações para estimação da altura do centro da Bola de Fogo em relação ao nível do solo

Fonte: Abbasi e Abbasi, 2006

Reference	<i>H</i> (m)
TNO [73]	$6.48M^{0.325}$
CCPS [1]	$4.35M^{0.333}$
Martinsen and Marx [126]	$4.33M^{0.25}t^{0.333}$ for $0 \leq t \leq t_B/3$

Tabela 3.7 - Modelos e estimativas para a fração de calor irradiado pela Bola de Fogo

Fonte: Abbasi e Abbasi, 2006

Source	F_r
Roberts [104]	$0.25 P_v^{0.32}$, for $P_v < 6$ MPa
Hymes [129]	0.3 for fireballs bursting below the relief valve set pressure, 0.4 for fireballs bursting at or above the relief valve set pressure
TNO [73]	$0.27 P_v^{0.32}$
Makhviladze and Yakush [130]	0.18–0.27
Roberts et al. [29]	0.25–0.4

P_v is the vapor pressure at the moment of burst (MPa).

Onde: P_v – pressão de vapor no momento da explosão (MPa)

Tabela 3.8 - Modelos e estimativas de poder de emissividade de superfície e incidência de radiação em objetos referência

Fonte: Abbasi e Abbasi, 2006

Reference	Surface emissive power, E (W/m^2), E	Heat radiation received by target, E_r (W/m^2)
Point source models		
Hymes [128]	–	$E_r = \frac{2.2\alpha\tau F_r H_c M^{0.67}}{4\pi l^2}$
CCPS [76] and Prugh [105]	$E = \frac{F_r M H_c}{\pi D_{max}^2 t_B}$	–
Lees [3]	–	$E_r = \frac{\alpha\tau F_r Q}{4\pi l^2}$
TNO [73]	$E = \frac{\Delta H M F_r}{\pi D_{max}^2 t_B}$	–
Solid flame models		
TNO [73] and CCPS [1]	–	$E_r = E\tau\eta_f$

ΔH : Net heat available for radiation (J/kg), H_c : Heat of Combustion (J/kg), α : Absorptivity of the target, Q : Heat release rate (W), l : Distance of fireball centre from the target/receptor (m).

Onde: H – calor latente disponível para radiação (J/Kg); H_c – Calor de combustão (J/Kg); α – Absorptividade do alvo referência; Q – Taxa de calor liberado (W); l – Distância entre o centro da bola de fogo e o alvo referência (m).

Tabela 3.9 – Correlações para fator de forma em cenários de bola de fogo

Fonte: Abbasi e Abbasi, 2006

Source	Position of object	v_F
CCPS [8]	Horizontal	$\frac{H(D_{max}/2)^2}{(L^2 + H^2)^{3/2}}$
CCPS [8]	Vertical ($L > D_{max}/2$)	$\frac{L(D_{max}/2)^2}{(L^2 + H^2)^{3/2}}$
CCPS [76] and TNO [73]	Highest value of view factor	$\left(\frac{D_{max}}{2X}\right)^2$

X: Distance of fireball centre from the target/receptor (m), L: Distance of point on ground directly below the fireball centre, from the target/receptor (m).

Onde: X ou l – Distância entre o centro da bola de fogo e o alvo referência (m); L – Distância entre o ponto diretamente abaixo do centro da bola de fogo no chão e o alvo referência

Tabela 3.10 – Expressões para transmissividade atmosférica

Fonte: Abbasi e Abbasi, 2006

Source	τ
Pietersen and Huerta [131] and CCPS [1]	$2.02(P_w X_s)^{-0.09}$
TNO [73]	$1 - \alpha_w - \alpha_c$

α_c : Absorption coefficient for carbon dioxide, α_w : Absorption factor for water vapour, P_w : Water partial pressure (Pa), X_s : Distance from surface of fireball to the target (m).

Onde: α_c – Coeficiente de absorção do dióxido de carbono; α_w – Fator de absorção do vapor d'água; P_w – Pressão parcial da água (Pa); X_s – Distância da superfície da bola de fogo ate o alvo referência (m)

É importante ressaltar que todos os modelos são passíveis de erro e incertezas, especialmente por tratarem de um fenômeno físico complexo. Assim diferentes autores apresentam distintas abordagens para o cálculo de uma mesma variável. Dessa forma, todos os métodos utilizados devem ser considerados como estimativas. No caso das simulações realizadas o software utiliza duas modelagens, Dispersão Gaussiana e Dispersão de Gases Pesados, havendo a opção de permitir o software escolher o modelo que gerará os resultados mais confiáveis a partir dos dados estabelecidos.

Os modelos dependem fundamentalmente de especificar quanto do líquido inflamável inicialmente contido no vaso efetivamente compõe a Bola de Fogo. Pode levar em consideração todo o material contido dentro do recipiente ou, que apenas uma fração do material acabará sendo utilizado como combustível.

3.4. Ações preventivas e mitigadoras

Embora severos, os efeitos do BLEVE podem ser evitados ou minimizados através do uso de técnicas adequadas ou boas práticas.

Dentre as estratégias utilizadas, destacam-se:

I - as que visam evitar o enfraquecimento do recipiente;

II - as que, após o enfraquecimento do vaso, tentam evitar uma sucessão de fatos que culminem em um evento de BLEVE;

III - as que evitam a maximização dos efeitos de um evento de BLEVE.

De acordo com Haddad (2011), enumeram-se algumas proposições de técnicas a fim de garantir a segurança:

- construção de piso inclinado sob os recipientes a fim de evitar a formação de poças;
- aplicação de água na forma de névoa, com o intuito de barrar o calor emitido pelas chamas, evitando que este alcance o recipiente;
- direcionamento das válvulas de alívio para cima (90°) a fim de diminuir o fluxo térmico do jato de fogo sobre o vaso;
- evitar o super-enchimento e possíveis níveis de sobrepressão;
- inspeções periódicas, checando a qualidade e a integridade da estrutura dos recipientes;
- presença de revestimento térmico, de modo a diminuir a passagem de calor externo para as paredes;
- dispor de equipamentos de resfriamento e combate a incêndio próximos aos recipientes;
- sistema de depressurização instantânea, de modo a promover uma rápida depressurização do recipiente;
- injeção de materiais supressores de modo a apagar as chamas;
- elaboração de planos de emergência para o caso de eventos indesejados. O plano de emergência deve ser posto em prática rapidamente, promovendo a evacuação do local.

Capítulo 4

Casos Históricos

De forma a ilustrar a gravidade do evento BLEVE, especialmente quando associado a formação de Bola de Fogo, foi feita uma revisão histórica. Neste item se destacam dois acidentes de proporções catastróficas, cuja análise encontra-se em maiores detalhes.

4.1. Acidentes Ocorridos

A Tabela 4.1 apresenta alguns importantes acidentes envolvendo o evento de BLEVE.

A partir dos dados é possível perceber que a magnitude dos eventos não tem relação direta com o produto, podendo o mesmo ser inflamável ou não. O material armazenado também não afeta a causa que desencadeou o BLEVE. Isso pode ser observado nos últimos dois casos citados. Em Mihama, Japão, em 2004, houveram quatro fatalidades devido a um BLEVE gerado por vapor causado por uma depressurização. Este foi mais severo que o de Tivissa, Espanha, em 2002, onde houve uma fatalidade sendo o combustível GNL. O armazenamento de vapor não tornou o evento menos severo, assim como o GNL não tornou o BLEVE mais catastrófico.

Tabela 4.1 - Acidentes importantes envolvendo ocorrência de BLEVE

Fonte: Adaptado de Haddad, 2011 e de Abbasi e Abbasi, 2006

Data	Local	Causa	Produto	Quantidade	Fatalidades
24/12/1939	Zarneste, Romênia	Superenchimento	Cloro	10 ton	60
28/07/1948	Ludwegghafen, Alemanha	Superenchimento	Éter Etílico	33 ton	209
04/01/1966	Feyzin, França	Fogo	Propano	1200 m ³	18
21/08/1968	Lieven, França	Mecânica	Amônia	20 ton	5
19/10/1968	Houston, Texas	Fogo	Cloreto de Vinila	50 ton	1
02/01/1969	Repcelok, Hungria	Superenchimento	CO ₂	35 ton	9
30/03/1972	Rio de Janeiro, Brasil	Fogo	Propano	1000 ton	37
27/11/1972	Santo Antonio, Texas	Corrosão	Dióxido de Carbono	0,01 ton	0

11/07/1978	San Carlos de La Rapita, Espanha	Superenchimento	Propileno	25 ton	211
10/01/1982	Spencer, Oklahoma	Superenchimento	Água	0,3 ton	7
12/07/1983	Reserve, Los Angeles	Reação Descontrolada	Clorobutadieno	1 ton	3
19/11/1984	Cidade do México, México	Fogo	Propano	3000 ton	500
19/11/1984	San Juan Ixhantepec, Cidade do México	Falha mecânica	LPG	~ 9000 m ³	650
28/01/1986	Kennedy Space Center, Flórida	Fogo	Hidrôgenio	115 ton	7
09/04/1998	Albert City, Los Angeles	Fogo	Propano	18000 gal	2
22/06/2002	Tivissa, Espanha	Acidente rodoviário	GNL	-	1
09/08/2004	Mihama, Japão	Despressurização de uma tubulação de vapor	Vapor	-	4

4.1.1. Acidente de Feyzin, França

As descrições apresentadas foram elaboradas por Abbasi e Abbasi (2006), e Ozunu, Turcu, Ajtai, Török (2010).

O acidente em Feyzin ocorreu em uma unidade de armazenamento de GLP que se encontrava a uma distância de 22,5 metros de uma avenida local.

A Figura 4.1 demonstra a disposição da refinaria, sendo ela composta por:

- 4 esferas de pressão utilizadas para tancagem de propano (1200 m³);
- 4 esferas de pressão utilizadas para tancagem de butano (2000 m³);
- 2 vasos de pressão cilíndricos utilizados para armazenar propano e butano (150 m³);

Causa:

Segundo os autores a causa inicial do evento foi erro humano. Um operador e um segurança estavam realizando procedimento de amostragem, coletando líquido da região inferior da esfera. O tanque apresentava capacidade de 1200 m³, armazenando propano.

Devido a necessidade de controlar a qualidade, amostras eram frequentemente coletadas das esferas. Havia um procedimento a ser seguido, que havia sido elaborado devido a problemas de congelamento de válvula gerado pela formação de gelo e hidrato de propano que haviam ocorrido em dois acidentes anteriores. O procedimento é ilustrado na Figura 4.2 (ICHEME, 1987).

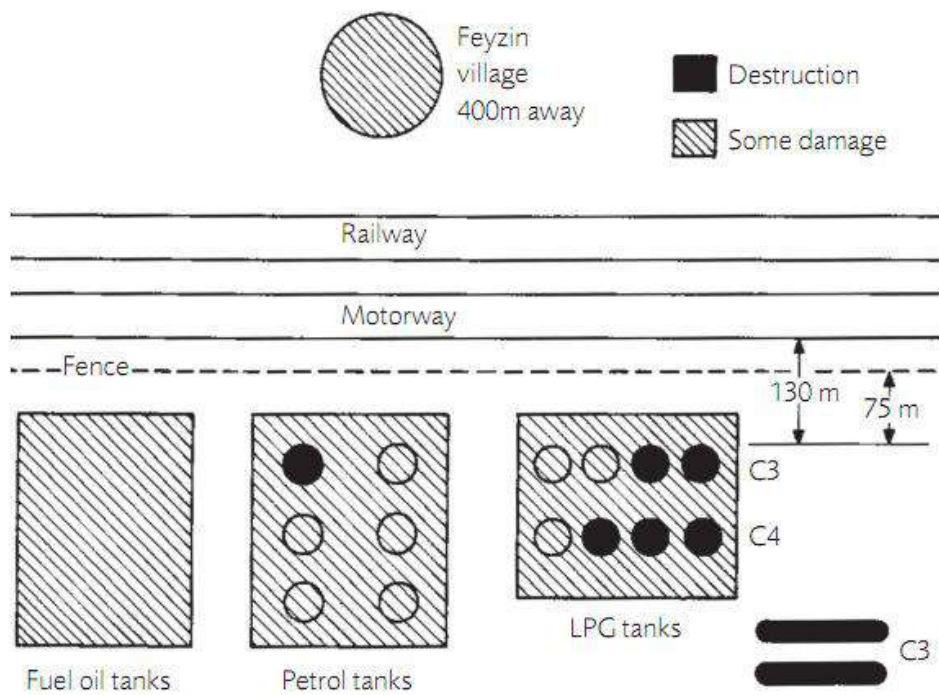
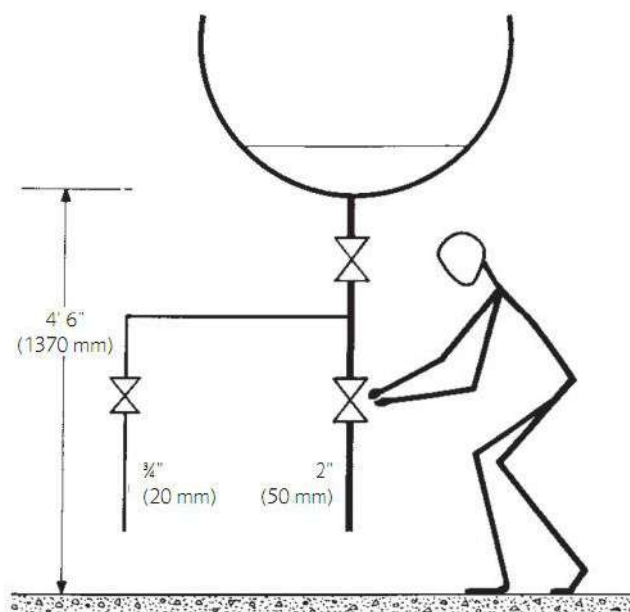


Figura 4.1 – Unidade de armazenamento de LPG, Feyzin (França)

Fonte: IChemE, 1987



Fonte: Adaptado de IChemE, 1987

Figura 4.2 – Operação de amostragem

O procedimento consistia em:

- Utilizar uma chave de válvula na operação das válvulas localizadas na descarga da esfera;
- Abrir totalmente a válvula superior mais próxima à esfera;
- Ajustar a vazão de descarga operando a válvula inferior de 2" (para drenagem) ou a válvula de 3/4" (para amostragem).

Fatos:

O operador da planta abriu as válvulas na ordem inversa àquela prevista nas instruções e com isto um entupimento parcial ocorreu. Na tentativa de consertar o problema, o operador abriu totalmente a válvula superior e devido provavelmente a essa despressurização abrupta um jato de propano foi ejetado, causando queimaduras no operador. O mesmo caiu, quebrando a chave usada no manuseio da válvula, impedindo a mesma de ser fechada, como consequência um grande vazamento ocorreu. Formou-se uma imensa nuvem de gás, que sofreu ignição a partir de um motor de carro próximo. Após a ignição formou-se um incêndio em nuvem, propagado até a origem do vazamento. O ponto de vazamento deu origem a um incêndio em jato.

Apesar de o incêndio estar estabelecido, não houve explosão imediata, o sistema de sprays de água da esfera conseguiu estabelecer um paliativo ao problema. No entanto, o estoque de água não era o suficiente para um combate incisivo, não conseguindo resfriar totalmente o vaso. Indica-se que o estoque foi utilizado em sua totalidade na tentativa de esfriar as esferas adjacentes, tentando assim evitar a propagação. Tal medida foi adotada baseada na suposição que as válvulas de segurança da esfera em chamas seriam o suficiente para evitar sua explosão. Porém uma das válvulas não abriu e a concomitante não foi capaz de suportar tamanha pressão.

Consequências:

Após aproximadamente 1 hora, a partir do início do incêndio, ocorreu o BLEVE da esfera, gerando uma intensa onda de choque e uma Bola de Fogo. Fragmentos foram projetados danificando estruturas e equipamentos próximos, o que acarretou em uma sequência de novos BLEVEs. A cadeia catastrófica de eventos matou 18 pessoas, 90 ficaram feridas e ocorreram inúmeros danos patrimoniais. As perdas em relação a unidade foram gigantescas, os danos estenderam-se por mais de 3000 m².

4.1.2. Acidente da REDUC, Rio de Janeiro, Brasil

As descrições aqui apresentadas foram adaptadas de Lione, Villaça, Aguiar (2011).

Este acidente ocorreu na Refinaria de Duque de Caxias (REDUC), localizada no distrito de Campos Elísios, Duque de Caxias, Rio de Janeiro.

Causa:

Novamente o evento iniciador indicado para este acidente foi erro humano. O procedimento de purga foi realizado de forma inadequada, gerando uma sequência de eventos que culminaram em um cenário catastrófico.

Fatos:

Em algum momento entre a troca de turnos do dia 30 de Março de 1972 era necessário ser realizado o procedimento de purga de uma das esferas de GLP. Devido ao processo de pressurização ao qual o gás é submetido, e devido a água ser mais densa que o gás liquefeito, a mesma acumula-se no fundo das esferas. Por este motivo faz-se necessário retirar essa água formada com o objetivo de alcançar as especificações necessárias ao GLP.

O procedimento a ser realizado naquela noite consistia na conexão de uma mangueira na válvula da tubulação de purga, o posicionamento da mangueira em uma vala, e a abertura da válvula. A partir de balanços de

massa e estimativas realizadas, o tempo de operação para remover a água, era conhecido. O operador deveria permanecer no local durante o procedimento, de modo a conferir o andamento do mesmo e fechar a válvula ao seu término.

Por razões não identificadas o operador não estava acompanhando o procedimento no momento em que a água foi completamente purgada. Desta forma, a válvula permaneceu aberta mesmo após o término da purga, levando a um vazamento de GLP. Para passar de líquido para gás o GLP remove calor das proximidades, causando brusca redução de temperatura. Houve o congelamento da válvula de drenagem, não permitindo mais o fechamento da mesma. Tentativas de descongelamento foram iniciadas, como o uso de linhas de vapor, porém sem sucesso.

Estima-se que o vazamento perdurou por aproximadamente 1 hora e meia, formando uma densa nuvem de gás. Em algum ponto, a nuvem sofreu ignição, gerando um incêndio em nuvem e conseqüente incêndio em jato no ponto de vazamento. O contato direto da chama com a parede do recipiente deu início a seqüência de fatos que, mais tarde, gerariam o BLEVE.

Durante as horas de combate ao incêndio, brigadas de incêndio de empresas vizinhas e de ambos os turnos da REDUC foram envolvidas. Porém nada foi capaz de conter o incêndio. O BLEVE ocorreu algumas horas após o início do incêndio.

Consequências:

O BLEVE da esfera gerou a projeção de inúmeros projéteis, acarretando em danos estruturais as outras esferas. Esse fato levou a um conjunto de explosões que veio a destruir totalmente o parque de esferas, conforme ilustrado na Figura 4.3. A explosão levou a morte de inúmeros brigadistas e funcionários que estavam na operação de combate ao incêndio.

A partir da descrição dos acidentes acima percebe-se algumas semelhanças entre os casos, como a falha humana como causa iniciadora dos

eventos e o desconhecimento mais detalhado sobre o evento de BLEVE. Este desconhecimento impediu a adoção de respostas adequadas, como a evacuação da área próxima aos vasos.



Figura 4.3 - Parque da REDUC destruído após seqüência de explosões

Fonte: PUIATTI, 2011 apud Lione, Villaça, Aguiar, 2011

Capítulo 5

Estudo de Caso

O objetivo principal deste estudo de caso é realizar simulações do evento BLEVE em diferentes vasos de GNL.

5.1. Premissas

Para tornar possível a simulação do evento acidental algumas premissas foram adotadas, dentre as quais se ressaltam:

1º - O gás natural liquefeito (GNL) é uma mistura de gases, no entanto apresenta majoritariamente metano em sua composição. O software utilizado para as análises apresenta a limitação de simular eventos com substâncias puras e não com misturas. Assim, todas as simulações realizadas foram procedidas apenas com metano. Este foi considerado um fator limitante no gerenciamento das curvas de vulnerabilidade.

2º - Os volumes dos recipientes permutam entre 1200 m³ e 2000 m³, valores usados como referência do acidente de Feyzin.

3º - Foram utilizados dois tipos de recipientes: esferas de armazenamento e vasos longitudinais.

4º - As análises foram realizadas supondo enchimento de 70 e 100% da capacidade dos tanques de armazenamento. Foram simuladas assim uma condição normal de operação (70%) e uma condição de superenchimento (100%).

5º - Foi adotada a premissa de 100% da massa de líquido contido no recipiente ser utilizada como combustível para a Bola de Fogo.

6º - Os recipientes encontraram-se inicialmente com temperatura interna de armazenamento de -165°C .

5.2. Casos

Uma vez definidas as premissas do estudo, foram inseridos os dados no programa. O mesmo estimou as consequências e as curvas de vulnerabilidade.

Os dados inseridos no programa foram: Localização do evento; Material contido dentro do recipiente; Informações sobre as condições atmosféricas; Informações sobre a estrutura do recipiente, e Quantidade de material contido.

Após a realização do cálculo observam-se os resultados referentes ao Diâmetro da Bola de Fogo formada e o tempo de duração da mesma.

Em relação as zonas de vulnerabilidade para radiação térmica o programa fornece as distâncias nas quais determinadas gravidades são atingidas, sendo elas, **zona letal, a curva vermelha – 10 KW/m; zona de queimaduras de 2º grau, a curva laranja – 5 KW/m; e zona de dor por calor curva amarela – 2 KW/m.**

Para efeito de cálculo foram criados alguns cenários:

1º - Vaso Longitudinal/ 1200m³/ 70%

A primeira simulação realizada empregou o menor volume de controle (1200m³) e uma condição normal de operação (70% de preenchimento do vaso). Ao inserir esses dados, o software estima o tamanho do vaso e a massa de líquido contida dentro do mesmo. Na sequência estima o diâmetro da bola de fogo e a duração da queima, fato que irá repetir-se em todos os Sumários de Texto das simulações, vide Figura 5.1:

```
SITE DATA:
Location: HOUSTON, TEXAS
Building Air Exchanges Per Hour: 1.34 (sheltered single storied)
Time: October 24, 2013 1745 hours CDT (using computer's clock)

CHEMICAL DATA:
Chemical Name: METHANE                      Molecular Weight: 16.04 g/mol
TEEL-1: 3000 ppm   TEEL-2: 5000 ppm   TEEL-3: 200000 ppm
LEL: 44000 ppm   UEL: 165000 ppm
Ambient Boiling Point: -161.5° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)
Wind: 8 meters/second from 180° true at 3 meters
Ground Roughness: open country           Cloud Cover: 5 tenths
Air Temperature: 25° F                   Stability Class: D
No Inversion Height                      Relative Humidity: 50%

SOURCE STRENGTH:
BLEVE of flammable liquid in horizontal cylindrical tank
Tank Diameter: 8 meters                   Tank Length: 23.9 meters
Tank Volume: 1200 cubic meters
Tank contains liquid
Internal Storage Temperature: -165° C
Chemical Mass in Tank: 397 tons           Tank is 70% full
Percentage of Tank Mass in Fireball: 100%
Fireball Diameter: 413 meters             Burn Duration: 22 seconds

THREAT ZONE:
Threat Modeled: Thermal radiation from fireball
Red   : 1.0 kilometers --- (10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec)
Orange: 1.4 kilometers --- (5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec)
Yellow: 2.2 kilometers --- (2.0 kW/(sq m) = pain within 60 sec)
```

Figura 5.1 - Sumário de Texto simulação 1

Como resultados tem-se que a duração da queima é de 22 segundos, e o diâmetro da Bola de Fogo é de 413 metros. As consequências foram 1 Km de raio de fatalidades do acidente, 1,4 o raio de queimaduras de segundo grau, e 2,2 Km o raio da radiação que causava apenas dor. As regiões estão apresentadas na Figura 5.2.

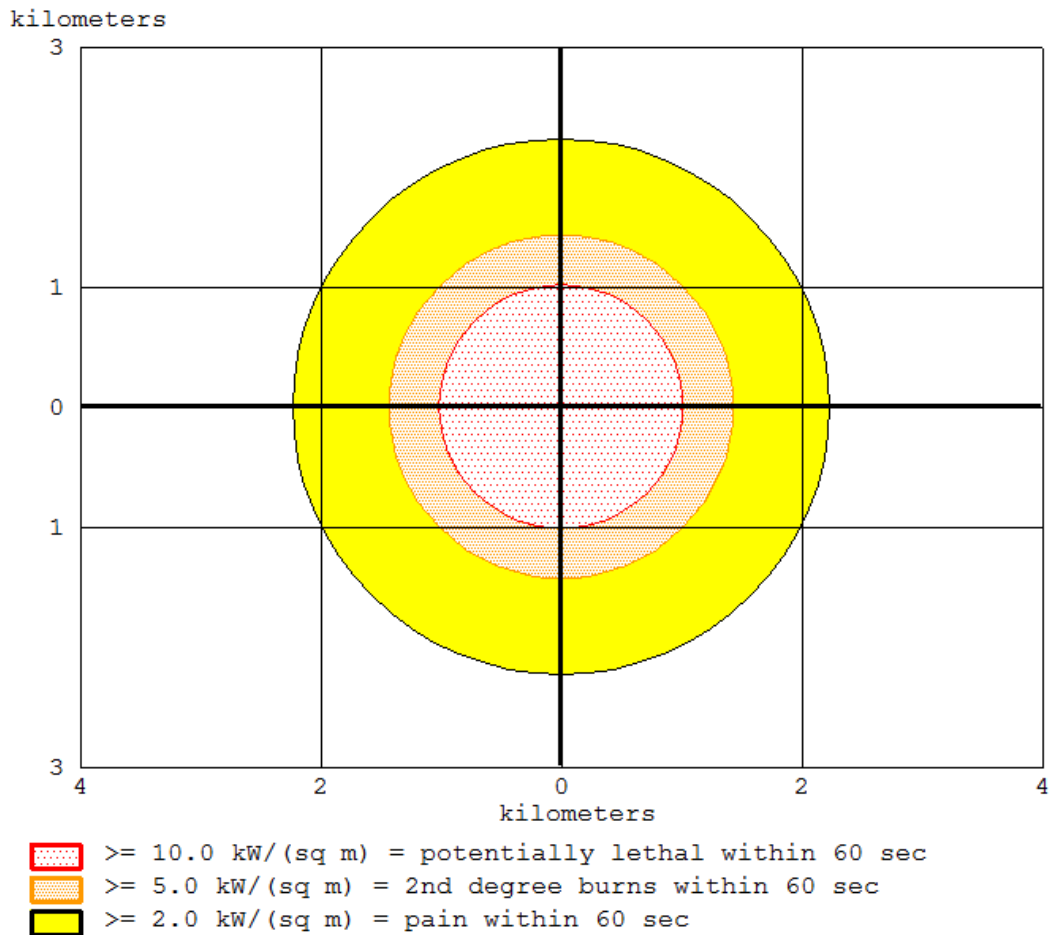


Figura 5.2 - Curvas de vulnerabilidade da simulação 1

2º - Vaso Longitudinal/ 1200m³ / 100%

A segunda simulação realizada usou o menor volume de controle (1200m³) e uma condição de superenchimento (100% de preenchimento do vaso). O tamanho do vaso manteve-se inalterado e a massa de líquido contida dentro foi novamente estimada ao mudar o preenchimento. A seguir foi estimado o diâmetro da bola de fogo e a duração da queima.

A segunda simulação apresentou um pequeno aumento nas zonas de vulnerabilidade, em média 0,2 quilômetros, assim como também demonstrou um pequeno aumento no tempo de queima, 2 segundos a mais. O diâmetro da Bola de Fogo teve um aumento de 50 metros.

Em termos de área afetada, o caso de superenchimento para o vaso longitudinal de 1200m³ não mostrou-se significativamente mais severo que a operação normal.

SITE DATA:

Location: HOUSTON, TEXAS
Building Air Exchanges Per Hour: 1.34 (sheltered single storied)
Time: October 24, 2013 1745 hours CDT (using computer's clock)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: METHANE Molecular Weight: 16.04 g/mol
TEEL-1: 3000 ppm TEEL-2: 5000 ppm TEEL-3: 200000 ppm
LEL: 44000 ppm UEL: 165000 ppm
Ambient Boiling Point: -161.5° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 8 meters/second from 180° true at 3 meters
Ground Roughness: open country Cloud Cover: 5 tenths
Air Temperature: 25° F Stability Class: D
No Inversion Height Relative Humidity: 50%

SOURCE STRENGTH:

BLEVE of flammable liquid in horizontal cylindrical tank
Tank Diameter: 8 meters Tank Length: 23.9 meters
Tank Volume: 1200 cubic meters
Tank contains liquid
Internal Storage Temperature: -165° C
Chemical Mass in Tank: 566 tons Tank is 100% full
Percentage of Tank Mass in Fireball: 100%
Fireball Diameter: 464 meters Burn Duration: 24 seconds

THREAT ZONE:

Threat Modeled: Thermal radiation from fireball
Red : 1.1 kilometers --- (10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec)
Orange: 1.6 kilometers --- (5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec)
Yellow: 2.5 kilometers --- (2.0 kW/(sq m) = pain within 60 sec)

Figura 5.3 – Sumário de Texto simulação 2

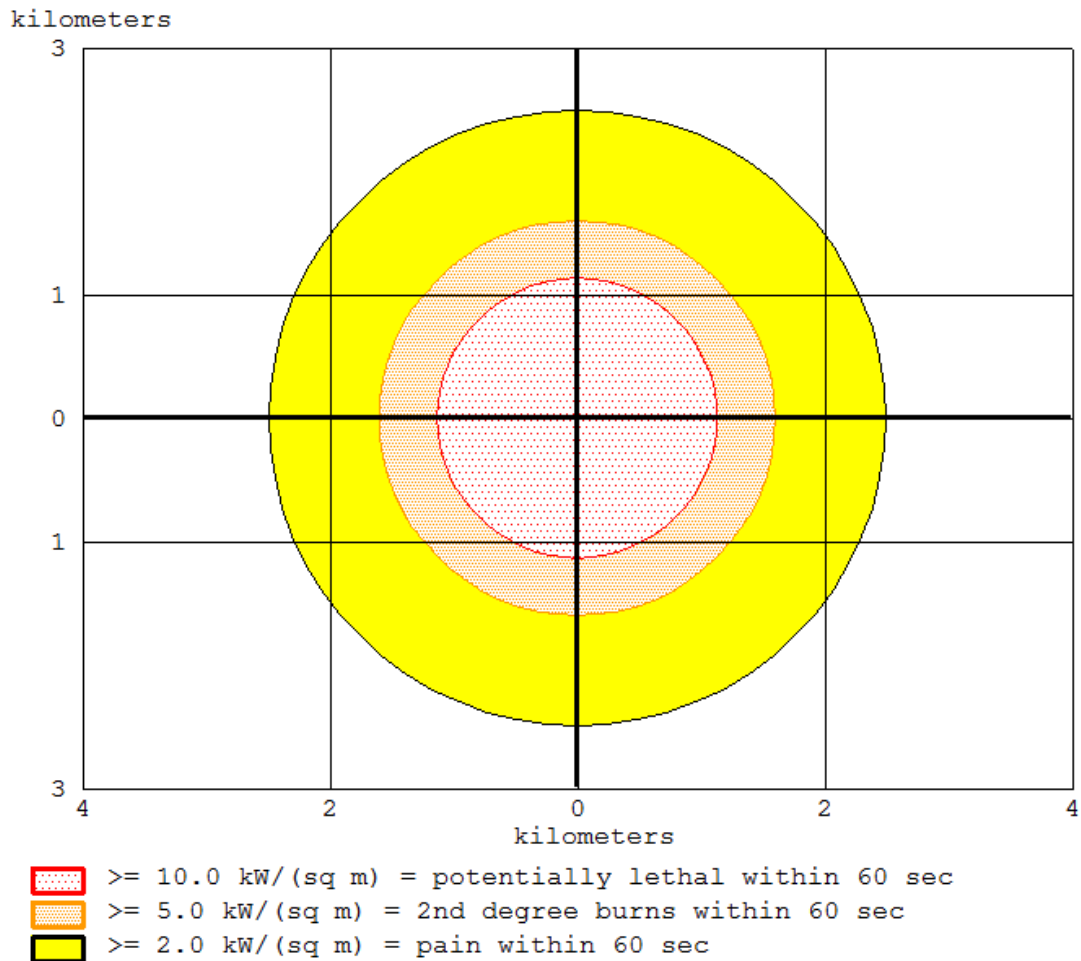


Figura 5.4 – Curvas de vulnerabilidade da simulação 2

3º - Vaso Longitudinal/ 2000m³ / 70%

A terceira simulação realizada usou o maior volume de controle (2000m³) e uma condição normal de operação (70% de preenchimento do vaso). O tamanho do vaso e a massa de líquido contida dentro do mesmo foi calculada. O diâmetro da bola de fogo e a duração da queima também foram estimados.

SITE DATA:

Location: HOUSTON, TEXAS
Building Air Exchanges Per Hour: 1.34 (sheltered single storied)
Time: October 24, 2013 1745 hours CDT (using computer's clock)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: METHANE Molecular Weight: 16.04 g/mol
TEEL-1: 3000 ppm TEEL-2: 5000 ppm TEEL-3: 200000 ppm
LEL: 44000 ppm UEL: 165000 ppm
Ambient Boiling Point: -161.5° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 8 meters/second from 180° true at 3 meters
Ground Roughness: open country Cloud Cover: 5 tenths
Air Temperature: 25° F Stability Class: D
No Inversion Height Relative Humidity: 50%

SOURCE STRENGTH:

BLEVE of flammable liquid in horizontal cylindrical tank
Tank Diameter: 8 meters Tank Length: 39.8 meters
Tank Volume: 2000 cubic meters
Tank contains liquid
Internal Storage Temperature: -165° C
Chemical Mass in Tank: 661 tons Tank is 70% full
Percentage of Tank Mass in Fireball: 100%
Fireball Diameter: 489 meters Burn Duration: 25 seconds

THREAT ZONE:

Threat Modeled: Thermal radiation from fireball
Red : 1.2 kilometers --- (10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec)
Orange: 1.7 kilometers --- (5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec)
Yellow: 2.6 kilometers --- (2.0 kW/(sq m) = pain within 60 sec)

Figura 5.5 – Sumário de Texto simulação 3

A terceira simulação, por considerar um volume maior de recipiente, conseqüentemente uma maior massa, deveria ocasionar conseqüências mais severas. No entanto, percebe-se que esse aumento de gravidade foi de baixa intensidade. Mesmo com 100 toneladas a mais de metano, as zonas de vulnerabilidade aumentaram em apenas 100 metros. O aumento mais relevante foi no tamanho da Bola de Fogo, apresentando acréscimo de aproximadamente 30 m no seu diâmetro. A bola de fogo teve um diâmetro estimado em 489 m. O tempo de queima foi de 25s.

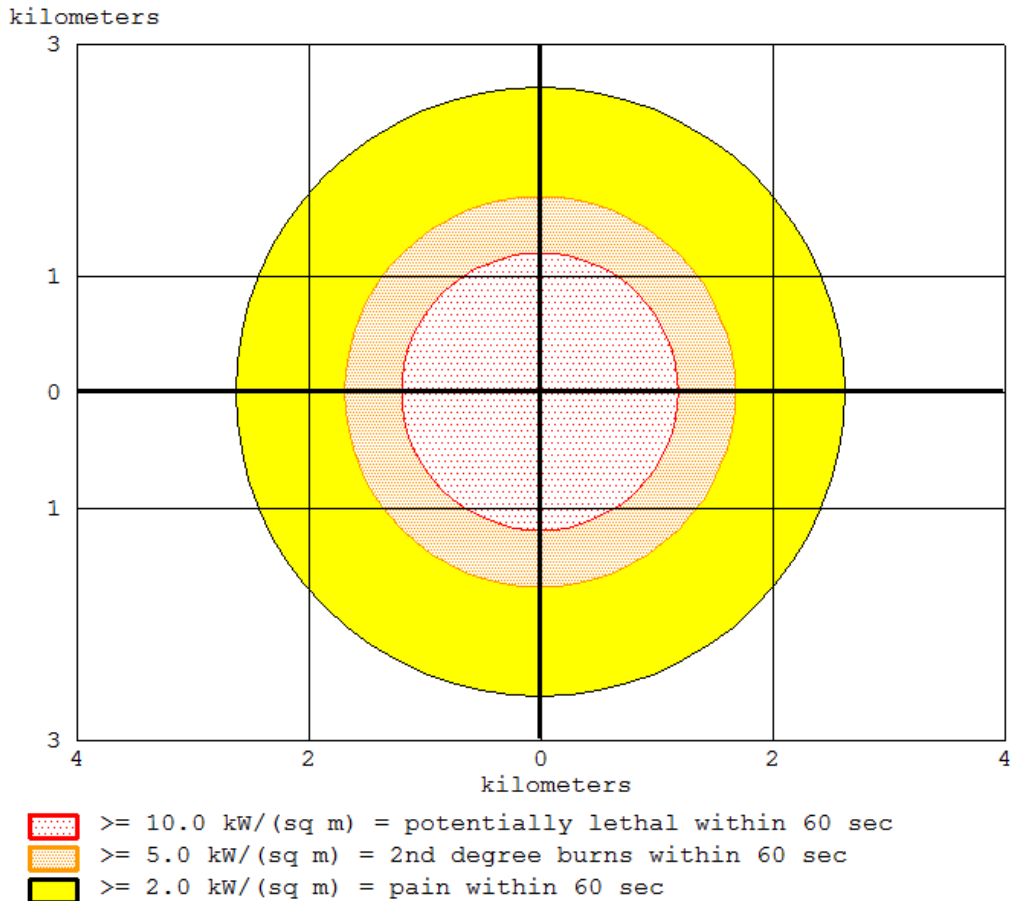


Figura 5.6 – Curvas de vulnerabilidade da simulação 3

4º - Vaso Longitudinal/ 2000m³/ 100%

A quarta simulação realizada usou o maior volume de controle (2000m³) e uma condição anormal de operação (100% de preenchimento do vaso). O tamanho do vaso manteve-se inalterado e a massa de líquido contida dentro do mesmo foi novamente estimada.

Como esperado, a quarta simulação apresentou os piores cenários em termos de severidade. Suas zonas de vulnerabilidade foram as maiores obtidas, chegando a quase 3 Km de efeitos surtidos, sendo 1,3 Km de raio da zona letal, 1,9 Km de raio para a zona de queimaduras de segunda grau, e 2,9 Km de raio para a zona de dor, conforme Figura 5.8 . Este cenário apresentou ainda o maior tamanho de Bola de Fogo dentre todas as simulações até então efetuadas, atingindo 551m. O tempo de queima foi estimado em 27 s.

SITE DATA:

Location: HOUSTON, TEXAS
Building Air Exchanges Per Hour: 1.34 (sheltered single storied)
Time: October 24, 2013 1745 hours CDT (using computer's clock)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: METHANE Molecular Weight: 16.04 g/mol
TEEL-1: 3000 ppm TEEL-2: 5000 ppm TEEL-3: 200000 ppm
LEL: 44000 ppm UEL: 165000 ppm
Ambient Boiling Point: -161.5° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 8 meters/second from 180° true at 3 meters
Ground Roughness: open country Cloud Cover: 5 tenths
Air Temperature: 25° F Stability Class: D
No Inversion Height Relative Humidity: 50%

SOURCE STRENGTH:

BLEVE of flammable liquid in horizontal cylindrical tank
Tank Diameter: 8 meters Tank Length: 39.8 meters
Tank Volume: 2000 cubic meters
Tank contains liquid
Internal Storage Temperature: -165° C
Chemical Mass in Tank: 943 tons Tank is 100% full
Percentage of Tank Mass in Fireball: 100%
Fireball Diameter: 551 meters Burn Duration: 27 seconds

THREAT ZONE:

Threat Modeled: Thermal radiation from fireball
Red : 1.3 kilometers --- (10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec)
Orange: 1.9 kilometers --- (5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec)
Yellow: 2.9 kilometers --- (2.0 kW/(sq m) = pain within 60 sec)

Figura 5.7 – Sumário de texto simulação 4

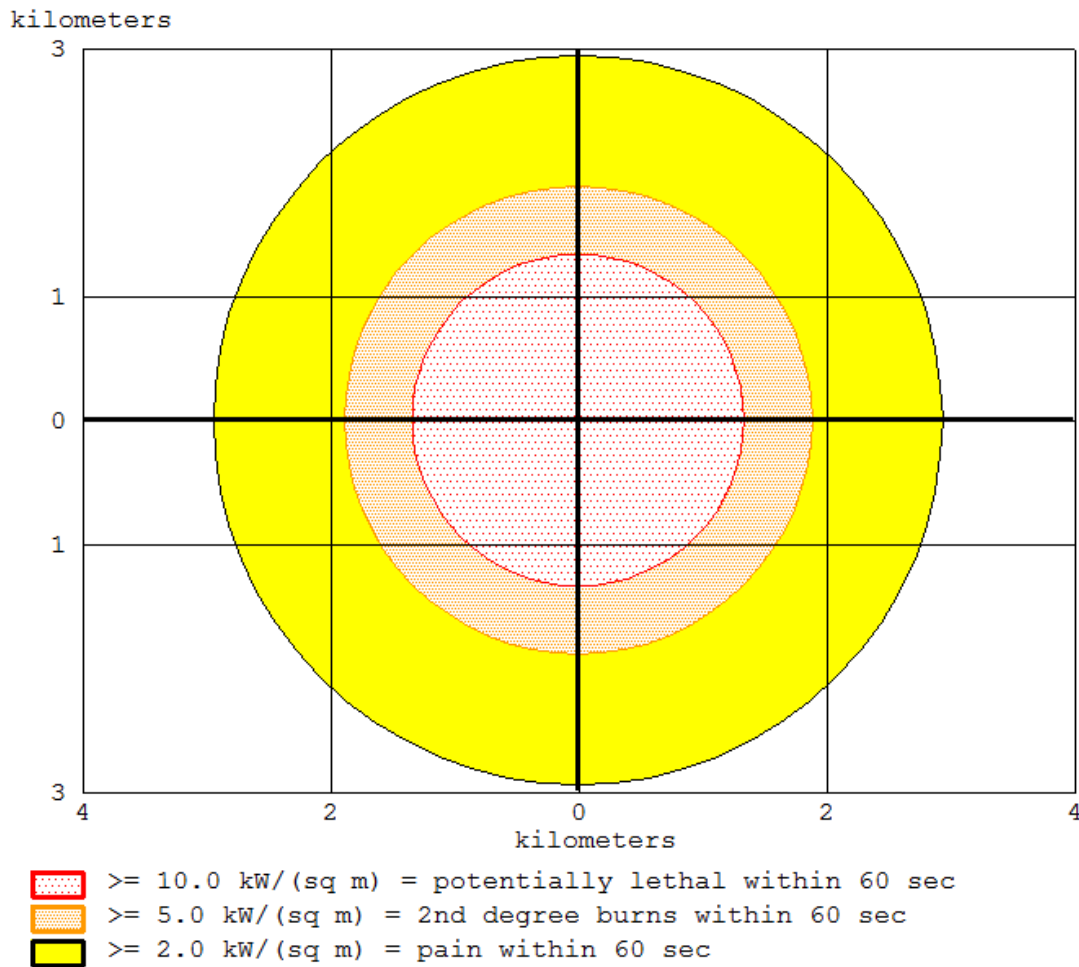


Figura 5.8 – Curvas de vulnerabilidade da simulação 4

5º - Esfera/ 1200m³ / 70%

A quinta simulação realizada usou o menor volume de controle (1200m³) e uma condição normal de operação (70% de preenchimento). No caso empregou-se vaso em formato de esfera.

Ao inserir esses dados, o software calcula automaticamente o tamanho da esfera e a massa de líquido contida dentro da mesma. Assim foi possível calcular o diâmetro da bola de fogo e a duração da queima.

SITE DATA:

Location: HOUSTON, TEXAS
Building Air Exchanges Per Hour: 1.34 (sheltered single storied)
Time: October 24, 2013 1745 hours CDT (using computer's clock)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: METHANE Molecular Weight: 16.04 g/mol
TEEL-1: 3000 ppm TEEL-2: 5000 ppm TEEL-3: 200000 ppm
LEL: 44000 ppm UEL: 165000 ppm
Ambient Boiling Point: -161.5° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 8 meters/second from 180° true at 3 meters
Ground Roughness: open country Cloud Cover: 5 tenths
Air Temperature: 25° F Stability Class: D
No Inversion Height Relative Humidity: 50%

SOURCE STRENGTH:

BLEVE of flammable liquid in spherical tank
Tank Diameter: 13.2 meters Tank Volume: 1200 cubic meters
Tank contains liquid
Internal Storage Temperature: -165° C
Chemical Mass in Tank: 397 tons Tank is 70% full
Percentage of Tank Mass in Fireball: 100%
Fireball Diameter: 413 meters Burn Duration: 22 seconds

THREAT ZONE:

Threat Modeled: Thermal radiation from fireball
Red : 1.0 kilometers --- (10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec)
Orange: 1.4 kilometers --- (5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec)
Yellow: 2.2 kilometers --- (2.0 kW/(sq m) = pain within 60 sec)

Figura 5.9 - Sumário de texto simulação 5

Os resultados obtidos não apresentaram diferenças quando comparados a simulação 1, sendo a duração da queima de 22 segundos e o diâmetro da Bola de Fogo de 413 metros. As consequências foram de 1 Km o raio de fatalidades do acidente, 1,4 o raio de queimaduras de segundo grau, e 2,2 Km o raio da radiação que causava apenas dor – conforme Figura 5.10.

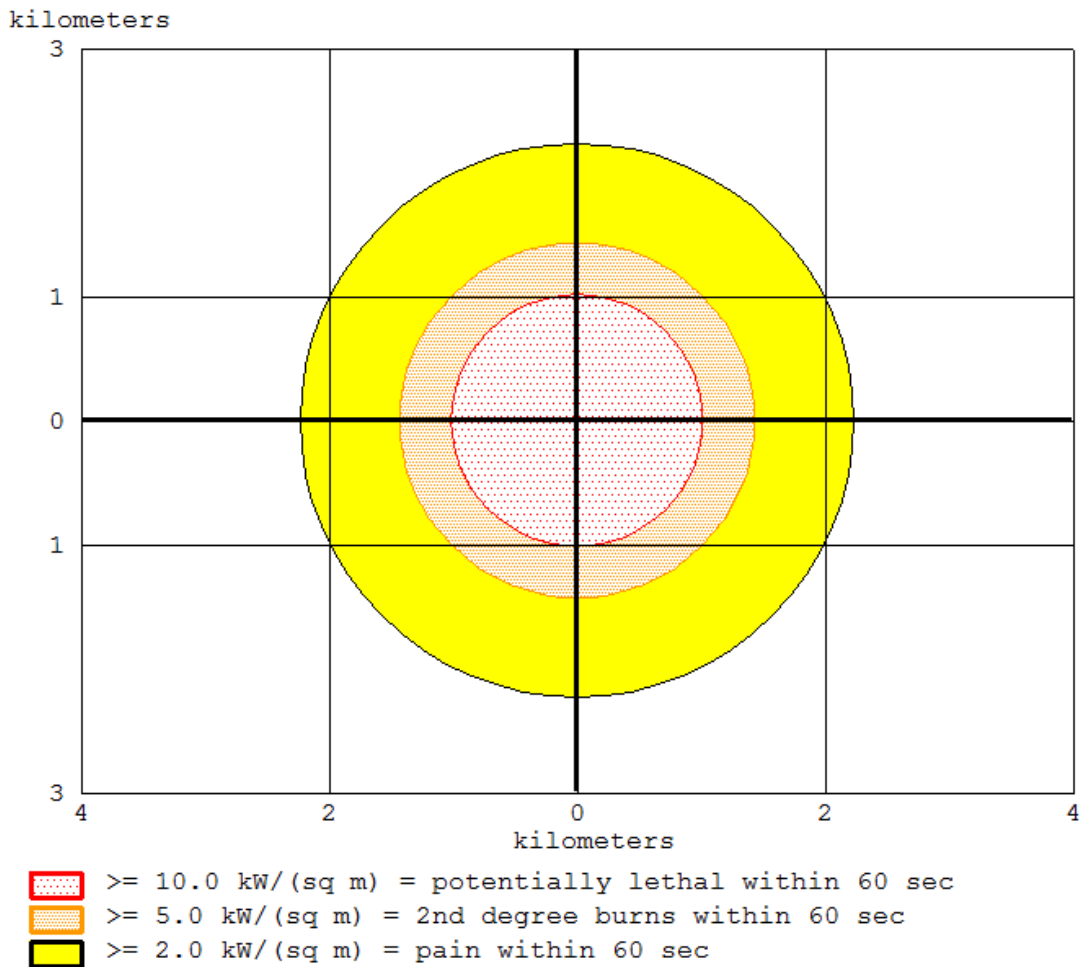


Figura 5.10 - Curvas de vulnerabilidade da simulação 5

6º - Esfera/ 1200m³/ 100%

A sexta simulação realizada usou o volume de controle de 1200m³ e uma condição anormal de operação (100% de preenchimento da esfera). O tamanho da esfera manteve-se inalterado e a massa de líquido contida dentro da mesma foi automaticamente calculada.

A sexta simulação, apresentou um pequeno aumento nas zonas de vulnerabilidade, em média 0,2 quilômetros, quando comparada com a quinta simulação. Assim como também, demonstrou um pequeno aumento no tempo de queima, 2 segundos a mais. O diâmetro da Bola de Fogo teve um aumento de 50 metros.

SITE DATA:

Location: HOUSTON, TEXAS
Building Air Exchanges Per Hour: 1.34 (sheltered single storied)
Time: October 24, 2013 1745 hours CDT (using computer's clock)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: METHANE Molecular Weight: 16.04 g/mol
TEEL-1: 3000 ppm TEEL-2: 5000 ppm TEEL-3: 200000 ppm
LEL: 44000 ppm UEL: 165000 ppm
Ambient Boiling Point: -161.5° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 8 meters/second from 180° true at 3 meters
Ground Roughness: open country Cloud Cover: 5 tenths
Air Temperature: 25° F Stability Class: D
No Inversion Height Relative Humidity: 50%

SOURCE STRENGTH:

BLEVE of flammable liquid in spherical tank
Tank Diameter: 13.2 meters Tank Volume: 1200 cubic meters
Tank contains liquid
Internal Storage Temperature: -165° C
Chemical Mass in Tank: 566 tons Tank is 100% full
Percentage of Tank Mass in Fireball: 100%
Fireball Diameter: 464 meters Burn Duration: 24 seconds

THREAT ZONE:

Threat Modeled: Thermal radiation from fireball
Red : 1.1 kilometers --- (10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec)
Orange: 1.6 kilometers --- (5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec)
Yellow: 2.5 kilometers --- (2.0 kW/(sq m) = pain within 60 sec)

Figura 5.11 - Sumário de texto simulação 6

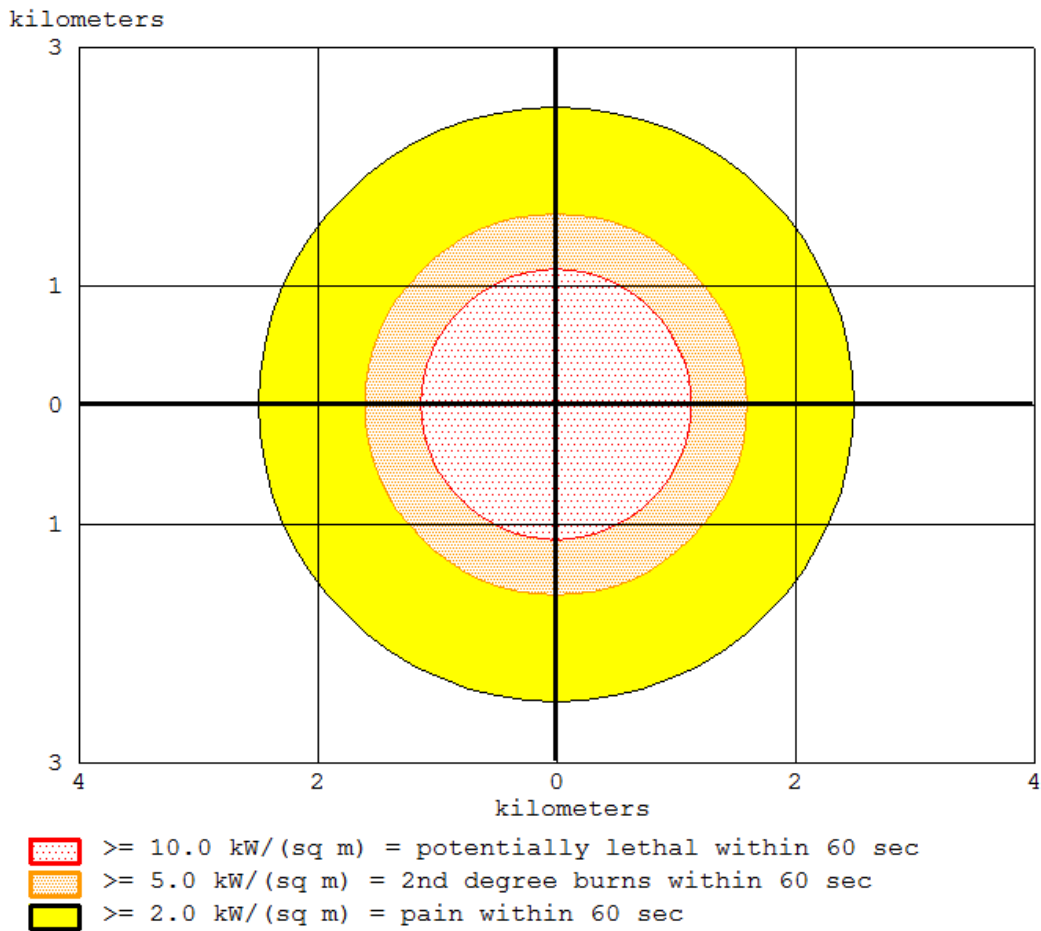


Figura 5.12 - Curvas de vulnerabilidade da simulação 6

7º - Esfera/ 2000m³/ 70%

A sétima simulação realizada usou o maior volume de controle (2000m³) e uma condição normal de operação (70% de preenchimento para a esfera). O tamanho da esfera e a massa de líquido contida dentro da mesma foram calculados automaticamente.

SITE DATA:

Location: HOUSTON, TEXAS
Building Air Exchanges Per Hour: 1.34 (sheltered single storied)
Time: October 24, 2013 1745 hours CDT (using computer's clock)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: METHANE Molecular Weight: 16.04 g/mol
TEEL-1: 3000 ppm TEEL-2: 5000 ppm TEEL-3: 200000 ppm
LEL: 44000 ppm UEL: 165000 ppm
Ambient Boiling Point: -161.5° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 8 meters/second from 180° true at 3 meters
Ground Roughness: open country Cloud Cover: 5 tenths
Air Temperature: 25° F Stability Class: D
No Inversion Height Relative Humidity: 50%

SOURCE STRENGTH:

BLEVE of flammable liquid in spherical tank
Tank Diameter: 15.6 meters Tank Volume: 2000 cubic meters
Tank contains liquid
Internal Storage Temperature: -165° C
Chemical Mass in Tank: 661 tons Tank is 70% full
Percentage of Tank Mass in Fireball: 100%
Fireball Diameter: 489 meters Burn Duration: 25 seconds

THREAT ZONE:

Threat Modeled: Thermal radiation from fireball
Red : 1.2 kilometers --- (10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec)
Orange: 1.7 kilometers --- (5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec)
Yellow: 2.6 kilometers --- (2.0 kW/(sq m) = pain within 60 sec)

Figura 5.13 - Sumário de texto simulação 7

A sétima simulação, por considerar um volume maior de esfera, deveria ocasionar consequências mais severas. Contudo, mesmo com 100 toneladas a mais de metano aproximadamente, as zonas de vulnerabilidade aumentaram em apenas 100 m (Figuras 5.14 e 5.12). O aumento mais relevante foi no tamanho da Bola de Fogo, com um acréscimo de aproximadamente 30 m no seu diâmetro, alcançando 489 m. O tempo de queima foi de 25s.

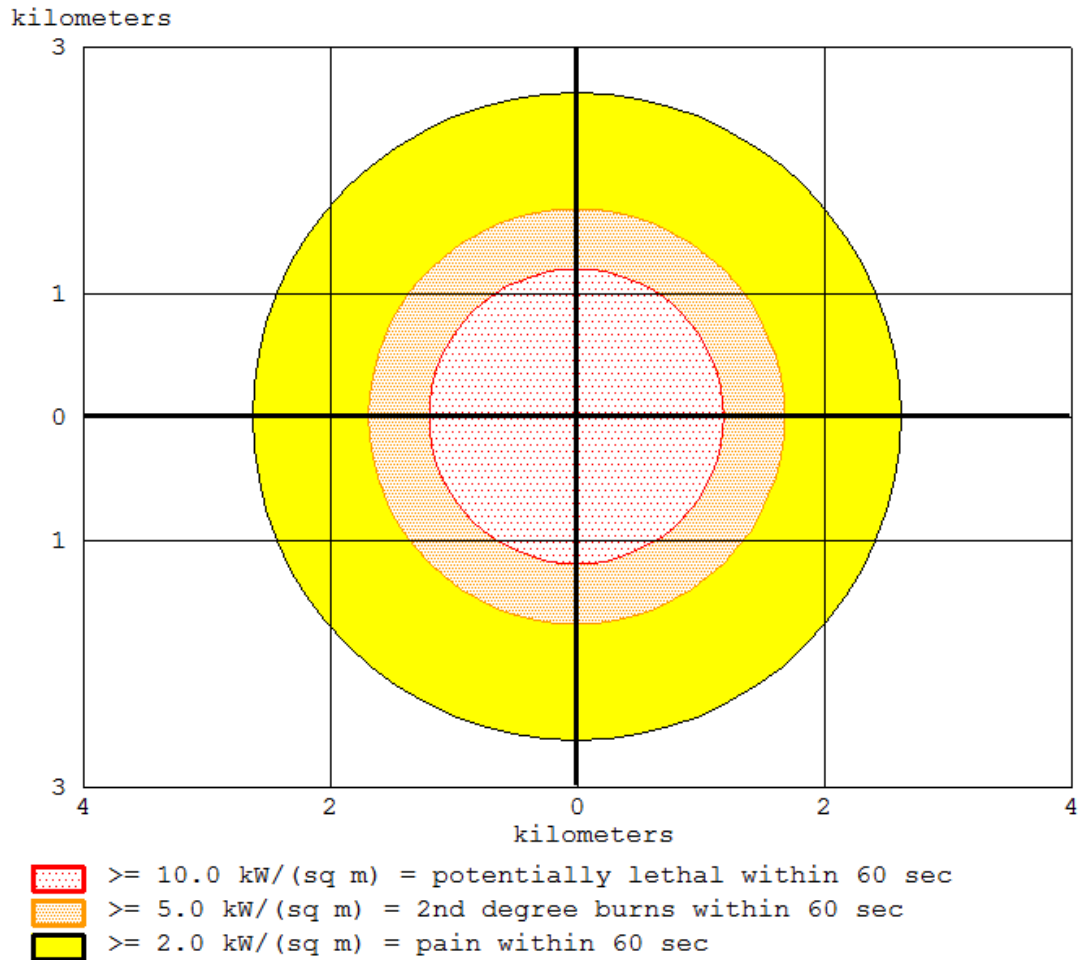


Figura 5.14 - Curvas de vulnerabilidade da simulação 7

8º - Esfera/ 2000m³/ 100%

A oitava simulação realizada usou o maior volume de controle (2000m³) e uma condição anormal de operação (100% de preenchimento da esfera). O tamanho da esfera manteve-se inalterado e a massa de líquido contida dentro da mesma foi estimada.

SITE DATA:

Location: HOUSTON, TEXAS
Building Air Exchanges Per Hour: 1.34 (sheltered single storied)
Time: October 24, 2013 1745 hours CDT (using computer's clock)

CHEMICAL DATA:

Chemical Name: METHANE Molecular Weight: 16.04 g/mol
TEEL-1: 3000 ppm TEEL-2: 5000 ppm TEEL-3: 200000 ppm
LEL: 44000 ppm UEL: 165000 ppm
Ambient Boiling Point: -161.5° C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 8 meters/second from 180° true at 3 meters
Ground Roughness: open country Cloud Cover: 5 tenths
Air Temperature: 25° F Stability Class: D
No Inversion Height Relative Humidity: 50%

SOURCE STRENGTH:

BLEVE of flammable liquid in spherical tank
Tank Diameter: 15.6 meters Tank Volume: 2000 cubic meters
Tank contains liquid
Internal Storage Temperature: -165° C
Chemical Mass in Tank: 943 tons Tank is 100% full
Percentage of Tank Mass in Fireball: 100%
Fireball Diameter: 551 meters Burn Duration: 27 seconds

THREAT ZONE:

Threat Modeled: Thermal radiation from fireball
Red : 1.3 kilometers --- (10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec)
Orange: 1.9 kilometers --- (5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec)
Yellow: 2.9 kilometers --- (2.0 kW/(sq m) = pain within 60 sec)

Figura 5.15 - Sumário de texto simulação 8

Novamente, como esperado, a oitava simulação apresentou o cenário mais severo. Suas zonas de vulnerabilidade foram as maiores obtidas, chegando a quase 3 Km. Especificamente, 1,3 Km de raio da zona letal, 1,9 Km de raio para a zona de queimaduras de segunda grau, e 2,9 Km de raio para a zona de dor, conforme Figura 5.16 . O diâmetro de Bola de Fogo atingiu 551m, com um tempo de queima de 27 s.

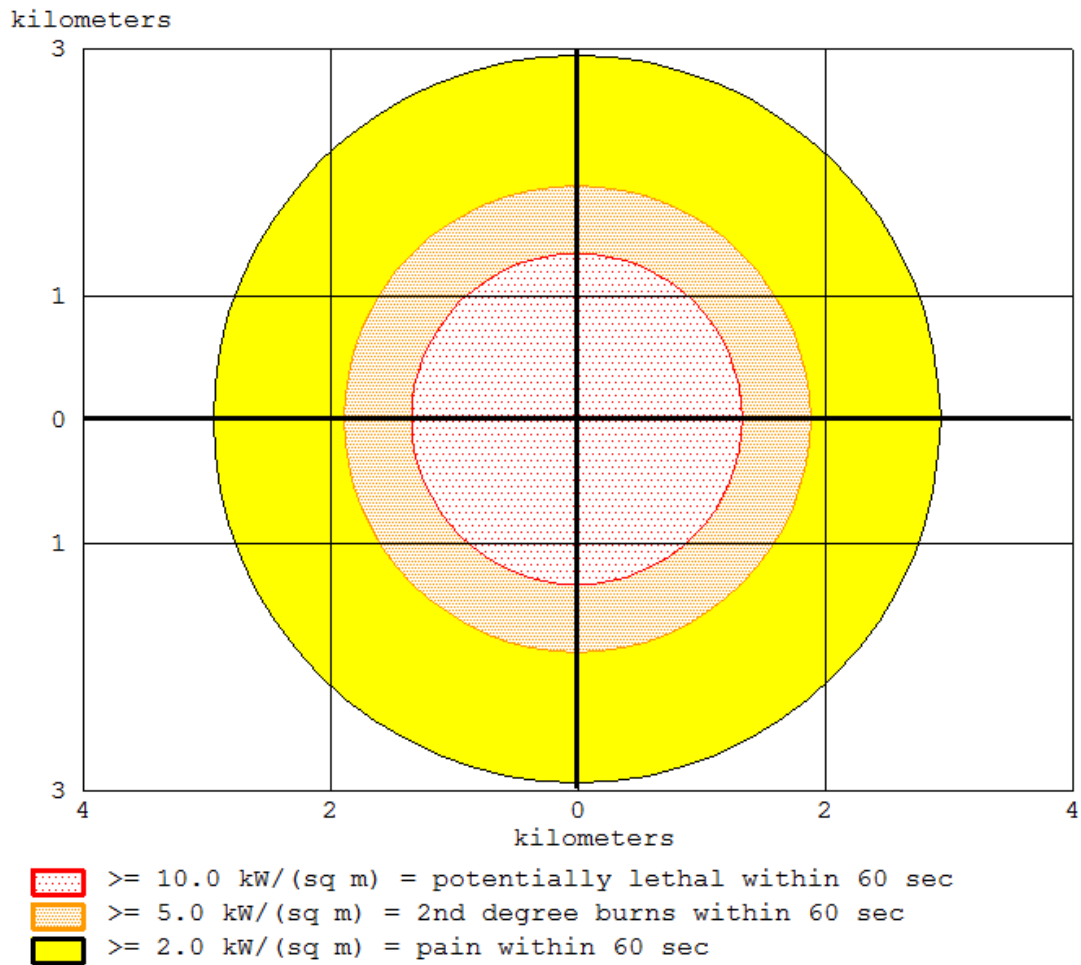


Figura 5.16 - Curvas de vulnerabilidade da simulação 8

Analisando individualmente cada uma das simulações pode-se perceber uma repetição de resultados. Desta forma, foram agrupados todos os dados de maior relevância para o estudo. A Tabela 5.1 apresenta os dados agrupados, com o objetivo de melhor analisá-los em conjunto.

Tabela 5.1 – Resultados das simulações de BLEVE

	Massa de líquido no tanque (ton)	Diâmetro da Bola de Fogo (m)	Duração da queima (s)	Potencial de Fatalidade (Km)	Queimaduras de 2º grau (Km)	Sensação de dor em até 60 s (Km)
Vaso Longitudinal/ 1200m³/ 70%	397	413	22	1.0	1.4	2.2
Vaso Longitudinal/1200 m³ / 100%	566	464	24	1.1	1.6	2.5
Vaso Longitudinal/ 2000m³ / 70%	661	489	25	1.2	1.7	2.6
Vaso Longitudinal/ 2000m³/ 100%	943	551	27	1.3	1.9	2.9
Esfera/ 1200m³ / 70%	397	413	22	1.0	1.4	2.2
Esfera/ 1200m³/ 100%	566	464	24	1.1	1.6	2.5
Esfera/ 2000m³/ 70%	661	489	25	1.2	1.7	2.6
Esfera/ 2000m³/ 100%	943	551	27	1.3	1.9	2.9

Percebe-se que o tipo / formato de recipiente não altera as consequências geradas pelo evento de BLEVE. As consequências são agravadas conforme a massa que alimenta a Bola de Fogo, independente da geometria do vaso, sendo tais conclusões alcançadas para as condições e dados estabelecidos para estas simulações.

Capítulo 6

Conclusão e Propostas futuras

6.1. Conclusão

A partir do estudo realizado é possível concluir sobre a gravidade do evento de BLEVE em instalações industriais de grande porte. Trata-se de um dos cenários de maior severidade que podem ocorrer em uma instalação. Suas consequências envolvem a perda de vidas humanas e destruição, as vezes total, das instalações. A simulação aqui empregada avalia apenas o efeito da radiação térmica emitida pela bola de fogo. A destruição causada pela cadeia de eventos posteriores a primeira explosão pode superar em muito o alcance estimado na simulações aqui realizadas. Tornando assim o cenário ainda mais grave.

Ressalta-se assim que, neste estudo, nem todos os efeitos foram estudados: modelos de sobrepressão não foram considerados, assim como múltiplas explosões. O estudo focou unicamente a radiação térmica emitida pela bola de fogo gerada pelo BLEVE em único tanque de líquido inflamável. Nesta análise pode-se perceber que o formato do vaso de armazenamento não altera as consequências do evento em termos de radiação térmica. O principal fator a ser considerado é a quantidade de matéria que servirá como

combustível para a Bola de Fogo. A correta estimativa deste fator é fundamental. Neste estudo estimou-se que 100% da massa contida no vaso alimentou a bola de fogo. Trata-se de um pior cenário, na medida que muitos autores estimam que apenas 1/3 da massa contida no vaso efetivamente alimenta a bola de fogo.

Neste estudo, o pior cenário simulado gerou efeitos sobre um raio de 3 Km ao redor da instalação. Um possível plano de emergência deveria considerar tais efeitos, adotando-se, por exemplo, um raio de evacuação de no mínimo 3 Km. Destaca-se que eventos em cadeia, como a explosão de dois ou mais vasos, poderiam tornar tal raio de evacuação insuficiente.

6.2. Propostas Futuras

A partir dos resultados aqui encontrados sugere-se realizar avaliações quanto ao dano gerado pela sobrepressão. Ao avaliar o cenário de BLEVE tanto em relação a radiação térmica quanto a sobrepressão, é possível compreender de modo mais completo a severidade do acidente. A simulação de múltiplas explosões também revela-se necessária, de modo a estimar uma zona de evacuação efetivamente segura.

De outro modo, seria interessante realizar simulações com outras condições climáticas e de terreno, ou seja, com dados de entrada diferente analisando o quanto isso modificaria os resultados obtidos.

Também seria interessante simular casos com a mesma quantidade de massa, no entanto com preenchimentos diferentes, ou seja, volumes diferentes de vaso, de modo a avaliar melhor a interferência das dimensões do vaso nos resultados.

Referências

HADDAD, E. BLEVE. São Paulo, SP: CETESB. Divisão de Gerenciamento de Riscos da CETESB, 2011.

SCHMITT, E. M. Análise de Consequências de uma Explosão tipo BLEVE de um caminhão autotanque de GLP tipo “Bobtail”. Porto Alegre, RS: UFRGS, Departamento de Engenharia Mecânica, julho de 2009. Curso de Especialização.

ICHEME, UK, The Feyzin disaster, Loss Prevention Bulletin; Issue 077, Outubro de 1987.

Cameron, I., Raman, R., 2005. "Process Systems Risk Management". Elsevier, San Diego.

VAZ, J.C. Síntese de controle e análise de cenários em plantas offshore de óleo e gás. Dissertação. (Pos-Graduação em Tecnologia de Processo Químicos e Bioquímicos). Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2009.

ABBASI, Tasneem; ABBASI, S.a.. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management. Journal Of Hazardous Materials. [s.i.], p. 489-519. 27 set. 2006. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389406011290>>.

Acesso em: 10 ago. 2013.

ABBASI, Tasneem; ABBASI, S.a.. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE) is fiftyand lives on! Journal Of Loss Prevention In The Process Industries. [s.i.], p. 485-487. 11 fev. 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423008000107>>.

Acesso em: 10 ago. 2013.

TÖRÖK, Zoltán et al. Comparative consequence analysis of the BLEVE phenomena in the context on Land Use Planning; Case study: The Feyzin accident. Process Safety And Environmental Protection. [s.i.], p. 1-7. 16 ago. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582010000856>>. Acesso em: 10 ago. 2013.

CROWL, Daniel A.; LOUVAR, Joseph F. Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications. Segunda Edição Massachusetts: Prentice Hall, 2002. 625 p.

MAIA, Clara Schreiber; BORBA, Tais de Araujo Jorge. HAZOP de um Sistema de Gás Combustível com Apoio de Simulação Dinâmica. 2012. 113 f. Projeto Final de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PIRES, Bruno de Oliveira Ribeiro. Análise de Confiabilidade de um Terminal de Regaseificação de Gás Natural Liquefeito. 2012. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

LIONE, Diego da Silva; Villaça, João Márcio Almeida; Aguiar, Leonardo Salim Damian. INVESTIGAÇÃO POR SIMULAÇÃO DINÂMICA PARA AUTOMAÇÃO DA DRENAGEM DE ESFERA DE GLP. 2011. 90 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MIANA, Mario et al. Calculation models for prediction of Liquefied Natural Gas (LNG) ageing during ship transportation. Applied Energy. [s.i.], p. 1687-1700. out. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626190900467X>>. Acesso em: 10 ago. 2013.

BICACO, Beatriz Solé. PROPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE ALARMES BASEADO EM ESTUDOS DE HAZOP PARA UMA PLANTA DE POLIETILENO. 2013. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

FILHO, D. H. M. Introdução ao Processamento e Tratamento do Gás Natural. Petrobras, 2005.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Superintendência de Comercialização e Movimentação de Petróleo, seus Derivados e Gás Natural – SCM - Boletim Mensal do Gás Natural – Número 30, 2011.

SHIVELY, B.; FERRARE, J.; PETTY, B. Understanding Today's Global LNG Business. 2nd Edition. Enerdynamics, 2010.

PETROBRAS – Relatório de Sustentabilidade 2012. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/rs2012/>> Acesso em: 15 de junho de 2013.

ALOHA – User's Manual (2007). CAMEO Software System

AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. Center for Chemical Process Safety. Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs. New York: AIChE, 1994

Accidental risk from technological origin. Method for decision and reference terms, 2ª Edição, CETESB - SP

Apêndice

Equações utilizadas pelo software ALOHA nas simulações realizadas:

- $$D_{\max}(\text{meters}) = 5.8 \text{mass}^{1/3}(\text{kg})$$

Equação para cálculo do diâmetro máximo. Mass = massa de material

- $$t_{\text{burn}}(\text{sec}) = 0.9 \text{mass}^{1/4}(\text{kg})$$

Equação para cálculo do tempo de queima da Bola de Fogo. Mass = massa de material

- $$\begin{aligned} \tau &= 1.382 - 0.135 \log_{10}(\rho_w x) \\ \tau &= 2.02(\rho_w x)^{-0.09} \end{aligned}$$

Equações para cálculo do coeficiente de transmissividade atmosférico. P_w = pressão parcial de vapor; X = Distância da superfície da bola de fogo ate o alvo referência (m)

- $$\rho_w = 99.89 \frac{R_H}{100} \exp\left(21.66 - \frac{5431.3}{T_a}\right)$$

Equação utilizada para cálculo da pressão parcial de vapor dada em P_a . T_a = temperatura ambiente do ar; R_h = humidade relativa

$$F = \frac{xr^2}{(x^2 + r^2)^{3/2}} \quad x > r$$

•

Equação usada para cálculo do fator de visão. ALOHA utiliza um fator de visão esférico para Bolas de Fogo. X = Distância da superfície da bola de fogo ate o alvo referência (m); r = raio da Bola de Fogo

$$q = E \cdot F \cdot \tau$$

•

Equação usada para cálculo da radiação recebida por um objeto a uma distância x.