

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Análise de Riscos de um Vazamento de Gás Natural em um  
Gasoduto**

**ADRIANA THOM ZIMMERMANN**

FLORIANÓPOLIS  
FEVEREIRO 2009

**Adriana Thom Zimmermann**

**Análise de Riscos de um Vazamento de Gás Natural em um  
Gasoduto**

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

**Orientadora:** Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Selene Maria de Arruda Guelli Ulson de Souza

**Co-orientador:** Prof. Dr. Antônio Augusto Ulson de Souza

Florianópolis – Santa Catarina  
Fevereiro de 2009

# **Análise de Riscos de um Vazamento de Gás Natural em um Gasoduto**

Por

**Adriana Thom Zimmermann**

Dissertação julgada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração Desenvolvimento de Processos Químicos e Biotecnológicos, aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina.

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Selene M. A. Guelli U. de Souza  
Orientadora

---

Prof. Dr. Antônio Augusto U. de Souza  
Co-orientador

---

Prof. Dr. Leonel Teixeira Pinto  
Coordenador do CPGENQ

## **Banca Examinadora:**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Selene M. A. Guelli U. de Souza

---

Prof. Dr. Antônio Augusto Ulson de Souza

---

Prof. Dr. Ayres Ferreira Morgado

---

Prof. Dr. José Alexandre Borges Valle

Aos meus pais e irmã, pelo apoio e incentivo em todos os momentos de minha vida.

Ao meu esposo, pelo apoio em todas as ocasiões.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química e à Herco Consultoria de Riscos, pela cooperação técnica e científica concedendo condições necessárias para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Aos professores orientadores Selene Maria de Arruda Guelli Ulson de Souza e Antônio Augusto Ulson de Souza, pela valorosa orientação, dedicação e principalmente amizade.

À Carlos Schlegel Neto, pelo apoio, conhecimento transferido e incentivo.

À amiga Andressa Regina Vasques, que além do apoio, esteve sempre pronta à troca de idéias e sugestões.

Ao meu esposo e amigo Antonio de Oliveira Júnior, pela cooperação.

Em especial aos Amigos, que mostraram ser verdadeiros amigos nas mais diversas ocasiões, demonstrando o grande companheirismo e amizade.

A todos os demais amigos do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, pelo tempo de convivência, fornecendo grande força e amizade na realização deste trabalho.

E a todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, contribuíram à sua maneira na realização e conclusão deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>x</b>
<b>SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA.....</b>	<b>xi</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xv</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1. Objetivo Geral .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2. Objetivos Específicos.....</b>	<b>20</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Análise de Risco .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Caracterização do Empreendimento e da Região .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3. Identificação de Perigos.....</b>	<b>22</b>
3.3.1. Fontes de risco internas.....	23
3.3.2. Fontes de risco externas.....	23
3.3.3. Técnicas para identificação de perigos .....	24
<b>3.4. Caracterização da Substância Selecionada para o         Estudo de Análise de Riscos.....</b>	<b>25</b>
3.4.1. Características do Produto.....	26
<b>3.5. Gerenciamento de Análise de Riscos .....</b>	<b>29</b>
3.5.1. Conceitos e definições da análise de risco .....	31
3.5.2. Ferramentas para análise de risco.....	35
3.5.3. Processo de análise de risco .....	36
3.5.4. Distâncias a serem consideradas .....	37
3.5.5. Critérios utilizados para avaliação da análise de riscos.....	37
3.5.6. Exposição ao risco.....	38
<b>3.6. Análise de Conseqüências .....</b>	<b>39</b>
3.6.1. Etapas do Estudo de Análise de Conseqüências.....	39
3.6.2. Formação da nuvem de gás .....	41
3.6.3. Tipos de fonte de energia .....	42
3.6.3.1. <i>Queima de nuvem e propagação da chama.....</i>	<i>43</i>
3.6.3.2. <i>Onda de choque .....</i>	<i>45</i>
<b>3.7. Análise Histórica de Acidentes.....</b>	<b>47</b>
3.7.1. MHIDAS (Major Hazard Incident Data Service).....	47
3.7.2. Resultados e avaliação do banco de dados.....	48
3.7.3. Alguns dos grandes acidentes que enfatizam a importância da Análise de Risco (Herco, 2007).....	50
3.7.4. Medidas para mitigar o risco .....	54

<b>4. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>56</b>
<b>4.1. Modelagem.....</b>	<b>56</b>
4.1.1. O método Multi-Energia .....	56
4.1.2. Modelo de vulnerabilidade de Eisenberg. ....	60
4.1.2.1. <i>Picos de sobrepressão para 1% de</i> <i>probabilidade do efeito.....</i>	<i>65</i>
4.1.2.2. <i>Picos de sobrepressão para 50% de</i> <i>probabilidade do efeito.....</i>	<i>65</i>
4.1.2.3. <i>Picos de sobrepressão para 99% de</i> <i>probabilidade do efeito.....</i>	<i>66</i>
4.1.3. Metodologia para o uso dos modelos .....	66
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>67</b>
<b>5.1. Típico Cenário de Acidente.....</b>	<b>70</b>
5.1.1. Tipologias acidentais .....	70
5.1.1.2. <i>Flash Fire.....</i>	<i>70</i>
5.1.1.3. <i>Explosão.....</i>	<i>71</i>
5.1.2. Identificação do perigo.....	72
<b>5.2. Seleção das Hipóteses acidentais.....</b>	<b>77</b>
5.2.1. Dados adicionais (Taxa de descarga do Gás Natural) .....	78
5.2.2. Aplicação do método Multi-Energia do TNO (2005).....	80
5.2.2.1. <i>Aproximações da curva do grau de</i> <i>confinamento 8 .....</i>	<i>82</i>
5.2.2.2. <i>Utilização de curvas características para o</i> <i>cálculo do pico de sobrepressão.....</i>	<i>83</i>
5.2.3. Estudo dos efeitos de explosões.....	84
5.2.3.1. <i>Cálculo para probabilidade de ocorrência de</i> <i>1% do dano.....</i>	<i>84</i>
5.2.3.2. <i>Cálculo para probabilidade de ocorrência de</i> <i>50% do dano.....</i>	<i>85</i>
5.2.3.3. <i>Cálculo para probabilidade de ocorrência de</i> <i>99% do dano.....</i>	<i>86</i>
5.2.4. <i>Determinação das distâncias.....</i>	<i>87</i>
5.2.4.1. <i>Distância em [m] para 1% de ocorrência dos</i> <i>danos.....</i>	<i>87</i>
5.2.4.2. <i>Distância em [m] para 50% de ocorrência dos</i> <i>danos.....</i>	<i>88</i>
5.2.4.3. <i>Distância em [m] para 99% de ocorrência dos</i> <i>danos.....</i>	<i>89</i>
5.2.5. Determinação do tempo de duração da fase positiva.....	91

5.3. Modelagem Através do Software PHAST (versão 6.53.1) .....	95
5.4. Cálculo do Alcance do Fragmento .....	105
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	110
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	113

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Limites de exposições.....	38
<b>Tabela 2:</b> Limites para os efeitos térmicos e mecânicos. ....	40
<b>Tabela 3:</b> Causas iniciadoras.....	49
<b>Tabela 4:</b> Tipologia acidental.....	49
<b>Tabela 5:</b> Principais Produtos envolvidos nos acidentes. ....	50
<b>Tabela 6:</b> Equações de Probit com seus respectivos usos.....	61
<b>Tabela 7:</b> Relação entre a variável de Probit e a probabilidade.....	62
<b>Tabela 8:</b> Prejuízos e danos possíveis de ocorrer às instalações e pessoas devido a efeitos de sobrepressão. ....	62
<b>Tabela 9:</b> Efeitos de Radiação Térmica.....	65
<b>Tabela 10:</b> Categorias de frequência.....	73
<b>Tabela 11:</b> Categorias de gravidade.....	74
<b>Tabela 12:</b> Matriz de Riscos resultante da combinação das categorias de Frequência e de Gravidade.....	74
<b>Tabela 13:</b> Distribuição das hipóteses acidentais na matriz de risco estudada. ....	77
<b>Tabela 14:</b> Seleção das hipóteses acidentais.....	78
<b>Tabela 15:</b> Dados do cenário avaliado na APP. ....	78
<b>Tabela 16:</b> Distância segura e tempo da duração de fase positiva, para um volume de gás ocupado de 30.000m <sup>3</sup> de Metano.....	94

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Fluxograma de execução do estudo. ....	18
<b>Figura 2:</b> Fluxograma do risco. ....	23
<b>Figura 3:</b> Exemplo de planilha para APP. ....	24
<b>Figura 4:</b> Fórmula estrutural do metano ....	26
<b>Figura 5:</b> Limites de explosão. ....	28
<b>Figura 6:</b> Eventos capazes de dar origem a conseqüências. ....	31
<b>Figura 7:</b> Fluxograma do processo para analisar o risco. ....	36
<b>Figura 8:</b> Variação da pressão e fases de uma onda choque (TNO, 1997). ....	45
<b>Figura 9:</b> Nuvem de vapor congestionada (CPR 14E, 1997; CPR 18E, 1999). ....	56
<b>Figura 10:</b> Curvas do método Multi-Energia - Sobrepressão (CPR 14E, 1997; CPR 18E, 1999). ....	58
<b>Figura 11:</b> Curvas do método Multi-Energia – Pressão Dinâmica (CPR 14E, 1997; CPR 18E, 1999). ....	59
<b>Figura 12:</b> Curvas do método Multi-Energia – Duração da fase positiva (CPR 14E, 1997; CPR 18E, 1999). ....	60
<b>Figura 13:</b> Fluxograma da seqüência de cálculos. ....	69
<b>Figura 14:</b> Análise preliminar de perigos apresentada nesse estudo. ....	76
<b>Figura 15:</b> Maiores alcances de sobrepressão. ....	95
<b>Figura 16:</b> Janela inicial do <i>Software</i> correspondente aos dados do produto (Material). ....	96
<b>Figura 17:</b> Segunda janela do <i>Software</i> correspondente ao cenário identificado na Tabela 15. ....	97
<b>Figura 18:</b> Janela de localização do cenário. ....	98
<b>Figura 19:</b> Janela Indoor/Outdoor. ....	99
<b>Figura 20:</b> Janela <i>Flammable</i> . ....	100
<b>Figura 21:</b> Janela do Método Multi-Energia. ....	101
<b>Figura 22:</b> Janela Discharge. ....	102
<b>Figura 23:</b> Comportamento da nuvem em relação à sobrepressão e à distância alcançada. ....	103
<b>Figura 24:</b> Maiores alcances gerados pela sobrepressão de 0,1, 0,3 e 0,4 bar. ....	104
<b>Figura 25:</b> Dados do relatório de saída. ....	105
<b>Figura 26:</b> Alcance escalar do fragmento versus distância inicial escalar. ....	107

## SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA

A = área do furo ( $L^2$ )

Ad = área exposta no plano perpendicular da trajetória ( $L^2$ )

APP = Análise Preliminar de Perigos

APR = Análise Preliminar de Riscos

AQR = Análise Qualitativa de Riscos

Cd = coeficiente de descarga (adimensional)

CETESB = Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CL = coeficiente de elevação (adimensional)

D = diâmetro do furo (L);

Dist8 = distância em que se tem a probabilidade de morte (L)

EAR = Estudo de Análises de Riscos

$E_v$  = Energia liberada por volume da mistura ( $M/(L t^2)$ )

Freq. = frequência

g = aceleração da gravidade ( $L/t^2$ )

Grav. = gravidade

Hip. = hipótese

IDLH = Imediatamente Perigoso à vida e à saúde

k = relação da capacidade de calor;  $C_p/C_v$  (adimensional)

L = comprimento de vazamento do duto (L)

M = massa molecular do metano (M/mol)

m = taxa de massa vazada (M/t)

n = número de moles (adimensional)

NFPA = Organização internacional de desenvolvimento de normas, fundada em 1896 para proteger pessoas, bens e o meio ambiente contra os efeitos danosos de incêndios

P = pressão de ruptura do vaso ( $M/(L t^2)$ )

P1 = pressão de entrada ( $M/(L t^2)$ )

$P_2$  = pressão de saída ( $M/(L t^2)$ )

$P_a$  = pressão atmosférica ( $M/(L t^2)$ )

PGR = Programa de Gerenciamento de Riscos

Picopress8 = pico de sobrepressão para uso da curva 8 ( $M/(L t^2)$ )

$P_o$  = Pico de sobrepressão ( $M/(L t^2)$ )

Prob = probabilidade de ocorrência do dano ( $M/(L t^2)$ )

$P_{s8}(x)$  = pico de sobrepressão para confinamento de nível 8 ( $M/(L t^2)$ )

$P_{sd8}(x)$  = pico de sobrepressão dinâmica para confinamento de nível 8 ( $M/(L t^2)$ )

$r$  = alcance do fragmento (L)

$\check{R}$  = alcance escalar máximo (adimensional)

$R$  = constante dos gases ideais ( $ML^2/(t^2 \text{ mol T})$ )

$R_s$  = Fator de escala (L)

$T$  = temperatura (T)

$T_1$  = temperatura inicial do metano na entrada (T)

$T_2$  = temperatura do metano na saída (T)

Temp<sub>tp8</sub> = tempo que a onda de choque possui valores acima da pressão atmosférica (t)

tp8 = tempo de duração da fase positiva (t)

$u$  = velocidade inicial do fragmento (L/t)

$v$  = velocidade do fluido (L/t)

$V$  = volume da mistura gás-ar ( $L^3$ )

$V_s$  = velocidade do som (L/t)

$W$  = massa do fragmento (M)

$X_s$  = razão entre a distância real e o fator de escala (adimensional)

$Y$  = variável do PROBIT (adimensional)

$z$  = distância real (L)

$\Delta H$  = entalpia por massa de matéria ( $L^2/t^2$ );

$\rho$  = massa específica ( $M/L^3$ )

yar = razão entre as capacidades caloríficas do gás à pressão e volume constantes

$C_p/C_v$  (adimensional)

## RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo de análise de risco de um possível vazamento de Gás Natural em um gasoduto supostamente instalado no Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina. Este estudo foi conduzido analisando-se os efeitos das explosões de uma nuvem de gás utilizando o método Multi-Energia como ferramenta principal de análise. Este estudo é importante, pois os riscos envolvidos em vazamentos com gasodutos levam às leis ambientais cada vez mais rígidas. O processo de análise de riscos é muito utilizado nas indústrias para localizar as falhas nas operações, processos, edificações, que podem provocar liberações químicas acidentais, fogo ou explosão, e para prover organização, tomar decisões para melhorar a segurança e o manuseio dos riscos das operações. Esta análise garante que as instalações operem de acordo com os padrões de segurança requeridos pelos órgãos ambientais, normalização nacional e internacional e requisitos de segurança da empresa. A análise de riscos é baseada em três níveis de avaliação. A Análise Qualitativa de Riscos (AQR) envolve os riscos de todas as unidades, elaborada em atendimento ao processo de licenciamento ambiental. Este trabalho teve como principal objetivo utilizar ferramentas de análise de riscos como a APP (Análise Preliminar de Perigo) para identificar e analisar o cenário de risco significativo associado com os processos ou atividades executadas. Utilizou-se o software PHAST (versão 5.63.1) para a verificação dos alcances dos efeitos físicos de sobrepressão calculados pelo método Multi-Energia (através de utilização de curvas) e modelo de Vulnerabilidade de Eisenberg (equações de PROBIT). De acordo com os dados obtidos, conclui-se que a ferramenta utilizada para análise de riscos (APP) e a metodologia utilizada (Método Multi-energia) oferece uma avaliação das distâncias seguras para probabilidade de morte por hemorragia pulmonar, colapso de estruturas e ruptura dos tímpanos para 1%, 50% e 99% de letalidade. Utilizando o Método Multi-energia como ferramenta da análise de risco, para 1% de probabilidade de danos, obtém-se a distância segura de 338m, para construção de instalações. Para a permanência de pessoas na região, foi obtida uma distância segura de 74m, e a distância adequada para que não ocorra a ruptura de tímpanos é

de 180m. Estes resultados estão dentro dos padrões estabelecidos pelo órgão ambiental (CETESB).

**Palavras chave:** Análise de Risco, Metodologia, Explosão, Gás Natural.

## ABSTRACT

In this work we carried out a risk analysis of a possible leak of Natural gas in relation to the effects of gas cloud explosions based on the Multi Energy methodology. This study carried out on a gas line near the facilities of the Chemical Engineering Department at the Federal University of Santa Catarina. The risks involved in gas lines leaks lead to more severe environment laws. The risks analysis process is very much used in industry to locate faults in the operation, processes, and buildings which may cause accidental chemical leaks, fire or explosion, and to provide organization, decision taking in order to improve safety and the handling of operation risks. This analysis guarantees that the facilities operate according to the safety standards required by the environmental institutions, national and international norms, and company safety requirements. Risk analysis is based on three levels of evaluation. The Qualitative Risk Analysis (AQR) involves risks of all the units, elaborated in attendance to the process of environmental licensing. This work had a principal objective to use risk analysis tools as the APP (Preliminary Analysis of Danger) to identify and analyze the significant risk scenario associated to the processes or activities executed in a specific gas line. The PHAST Software (version 5.63.1) was used for verification of the physical effect of overpressure calculated by the Multi-Energy method (through use of curves) and model of Vulnerability of Eisenberg (PROBIT equations). According to the data obtained, the conclusion of the tool used for the risk analysis (APP) and the methodology used (Method Multi-energy) offers an evaluation of the safe distances for the possibility of death due to lung hemorrhage, collapse of structures, and rupture of the ear drums to lethally 1%, 50% and 99%. Using the Multi-Energy method as a tool of risk analysis, for probability of 1%, the safety distance is 338 meters, of the build installations. To the permanence of people at the place, it was obtained the safety distance of 74 meters. The safety distance to do not to breach spandrels is 180 meters. These results are determined as the pattern established by ambient agency (CETESB).

**Keywords:** Risk Analysis, Methodology, Explosions.

# 1. INTRODUÇÃO

Desde os tempos antigos, o homem tem desenvolvido atividades e ferramentas, que apresentam riscos potenciais, e que podem se materializar causando acidente com lesões pessoais, ou perdas materiais.

No mundo atual são freqüentes os acidentes envolvendo segurança de processo e danos causados por indústrias químicas e petroquímicas e que, conseqüentemente, geram danos pessoais, materiais e ambientais (SERPA, 2002).

O desenvolvimento de técnicas de prevenção de acidentes em processos químicos é constante (DUARTE, 2002). Atualmente existem diversas técnicas que permitem a identificação dos perigos de forma organizada e sistemática.

As empresas que trabalham com produtos tóxicos ou inflamáveis realizam estudos de Análise de Riscos para identificar, analisar e avaliar os eventuais riscos advindos de acidentes de processo, que possam representar perigo aos públicos interno e externo.

Dentro do escopo de Avaliação de Riscos, a fase mais importante consiste na identificação dos perigos e das falhas. O objetivo da Análise de Risco é capacitar para diferenciar as técnicas de avaliação de risco e o entendimento da importância da Análise de Risco.

A maioria dos perigos inerentes à indústria moderna tem como característica chave o fato de que uma possível falha em seus sistemas de segurança pode ocasionar impactos difíceis de serem contidos a nível local, podendo levar a conseqüências transnacionais como prejuízos à imagem da empresa.

A necessidade e a importância da prevenção de perdas foram enfatizadas depois de vários desastres com conseqüências catastróficas nas décadas de 60 e 70. A partir desta época muitos estudos, conferências e documentos foram realizados promovendo expressivo avanço na área de confiabilidade, transformando a Análise de Risco em ferramenta fundamental nos dias de hoje.

Segundo Lees (1996), a explosão de uma nuvem de vapor inflamável em uma unidade petroquímica é um tipo de acidente que tem conseqüências mais severas que incêndios ou mesmo liberação de nuvens tóxicas. Quando uma explosão de nuvem de vapor ocorre, não é incomum que a perda de vidas e os danos sejam maiores do que outros eventos acidentais. Um exemplo representativo deste tipo de evento é o acidente que ocorreu na PETROBRAS, unidade situada no município de São Miguel dos Campos (AL) onde, em 23 de setembro de 2008, houve um grande vazamento em uma tubulação de Gás Natural seguido de explosão, resultando em quatro mortos. Acidentes como estes motivaram órgãos governamentais no mundo todo na elaboração de leis de proteção ambiental, de segurança nos processos industriais e na pesquisa de novas técnicas de identificação de perigos.

Neste trabalho será feita uma determinação de área de sobrepressões, verificando assim, o principal efeito danoso de uma explosão de nuvem de vapor inflamável, com base no método de Multi-Energia (VAN DEN BERG, 1985; VAN DEN BERG *et al.*, 1987), desenvolvido por pesquisadores do Prins Mauritz Laboratory (TNO) e amplamente usado em análise de riscos. O produto selecionado para análise é o Gás Natural, o qual é usado e produzido em diversos processos industriais em plantas petroquímicas.

O cenário identificado será calculado e comparado com os alcances de sobrepressão de 1%, 50% e 99% de letalidade, por meio de modelagens matemáticas que serão comparadas com os resultados obtidos por simulação com o uso do *Software* específico PHAST (versão 6.53.1). Por meio destes cálculos serão traçadas as prováveis curvas de sobrepressão.

Este estudo está baseado em técnicas de análises de riscos para estimar os alcances de explosão em caso de um possível vazamento de Gás Natural em um duto, para avaliar se o local a ser instalado o gasoduto (próximo ao Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina) oferece riscos ao entorno das instalações.

Depois de levantar este cenário e conhecer os dados de operação (Análise Qualitativa), serão realizados os cálculos (Análise Quantitativa) e os mesmos serão comparados com os resultados obtidos por meio do uso do *Software* PHAST (versão 6.53.1), para dispersão de gases (DNV Technica, 2008, 2002, 1997, 1995a, 1995b),

realizando-se assim, plotagens das informações dos resultados em formas gráficas utilizando o *Software* Auto-Cad (Versão 2006).

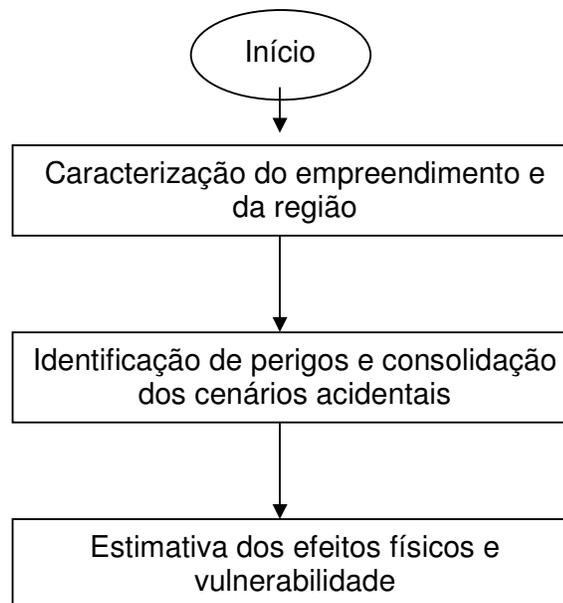
Além disto, serão realizadas pesquisas, visando à busca de assuntos relacionados ao desenvolvimento das atividades como, análise de confiabilidade e de características físico-químicas das substâncias.

Dentro desta linha de pesquisa, serão aplicados conceitos de Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica. Também será necessária a realização de pesquisas com relação às instruções normativas e padrões de projeto. Para o estudo faz-se necessário:

- a) Visita em campo (conhecimento do processo);
- b) Coleta de dados (operacionais);
- c) Modelagem matemática e,
- d) Avaliação dos resultados.

Através das simulações de vazamentos será possível prever as conseqüências de explosões da nuvem de gás.

A seqüência de etapas do presente estudo pode ser observada de forma esquemática no fluxograma apresentado na Figura 1.



**Figura 1:** Fluxograma de execução do estudo.

Em linhas gerais este estudo está direcionado a uma Análise de Riscos de um possível vazamento de Gás Natural com relação aos efeitos físicos de explosões de nuvem de gás com base no método Multi-Energia, avaliando as conseqüências dos resultados de sobrepressão de 1%, 50% e 99% de letalidade, sendo assim, possível comparar as conseqüências preditas através de *Software* específico (PHA 6.53.1) (DNV Technica, 2008, 2002, 1997, 1995a, 1995b), sendo o mesmo *Software* utilizado nas empresas petroquímicas para análise de dispersão de gases.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral estudar as conseqüências de explosão de um possível vazamento de Gás Natural em um gasoduto e comparar com as conseqüências preditas através de *Software* específico (PHAST 6.53.1) (DNV Technica, 2008, 2002, 1997, 1995a, 1995b), além de identificar as conseqüências de eventos acidentais proporcionando, desta forma, maior segurança ao processo.

Em uma análise de riscos são identificadas as possíveis causas e respectivas conseqüências de acidentes. Este processo compreende diversas etapas, incluindo-se a estimativa dos cenários de riscos. Os cenários de riscos são modelados, através destas simulações traçam-se as prováveis curvas de sobrepressão (explosão). A partir dessas curvas é possível quantificar os danos sobre instalações, seres humanos, meio ambiente, extensão das áreas atingidas e comportamento da nuvem explosiva.

### 2.2. Objetivos específicos

Para a consolidação do objetivo geral, faz-se necessária a execução das etapas pertinentes ao trabalho proposto. Portanto, os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados:

- Estudar o modelo de efeito de explosão da nuvem de gás;
- Simular uma possível explosão de Gás Natural;
- Determinar as regiões atingidas;
- Determinar os alcances dos danos;
- Determinar os alcances máximos de um fragmento decorrente de uma explosão.

### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1. Análise de Risco**

Existem diversos métodos de análise de riscos. Cada método está relacionado a tipos de análises diferentes. A metodologia utilizada foi a APP (Análise Preliminar de Perigo). Esta metodologia procura examinar as maneiras pelas quais a energia ou o material de processo pode ser liberado de forma descontrolada, levantando, para cada um dos perigos identificados, as suas causas, os métodos de detecção disponíveis e os efeitos sobre os trabalhadores, a população circunvizinha e sobre o meio ambiente.

A Análise de Riscos identifica as ameaças mais prováveis de ocorrência, analisando as vulnerabilidades encontradas na organização e possibilitando a tomada de decisão em relação aos riscos principais. Conhecendo os riscos principais de um processo, pode-se tomar uma das seguintes medidas: eliminá-los, minimizá-los, compartilhá-los ou assumi-los (CETESB, 2003; AIChE, 1995; ABS CONSULTING, 2004).

O objetivo primário na recuperação de desastres é garantir a proteção dos ativos críticos frente a determinadas ameaças. Uma ameaça em potencial afeta diretamente aqueles ativos que estão mais expostos, e esta exposição é medida pelo grau de vulnerabilidade daquelas ameaças principais. Neste contexto, a análise de riscos entra em cena. Cada área funcional da organização deve ser analisada para determinar o risco potencial e o impacto relacionado a vários desastres ou ameaças, o que se chama de processo de análise de riscos (ISAAC, 1995).

A Análise Qualitativa de Riscos (AQR), que envolve os riscos de todas as unidades, elaborada em atendimento ao processo de licenciamento ambiental, é realizada a partir da aplicação da técnica de análise de riscos preliminar (APP), a qual basicamente consiste primeiramente em caracterizar o empreendimento e a região, posteriormente identificar os perigos e caracterizar a substância em estudo, para assim dar continuidade ao estudo completo da análise de risco quantitativa (AIChE, 1995).

### **3.2. Caracterização do Empreendimento e da Região**

O primeiro passo para a realização do estudo de análise de riscos é a compilação de dados relativos às características do empreendimento, necessários para o desenvolvimento do trabalho.

Esses dados são de especial importância para que seja possível caracterizar o empreendimento, contemplando seus aspectos construtivos e operacionais, além das peculiaridades da região onde o mesmo se encontra ou será instalado (AIChE, 1995).

### **3.3. Identificação de Perigos**

A identificação de perigos é a segunda etapa a ser desenvolvida no estudo de análise de riscos e consiste na aplicação de técnicas estruturadas para a identificação das possíveis seqüências de acidentes, para a definição dos cenários acidentais a serem estudados de forma detalhada.

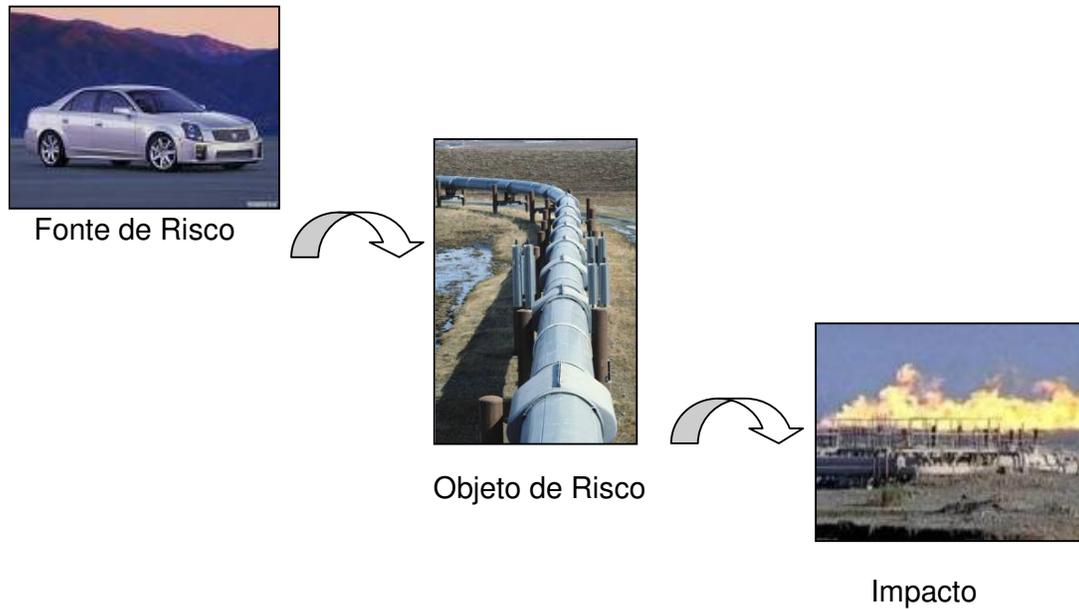
Muitas são as técnicas disponíveis para a realização desta atividade e, dependendo do empreendimento a ser analisado e do detalhamento necessário, deve-se utilizar as metodologias mais adequadas para o caso em estudo. Neste estudo a metodologia utilizada foi a APR (Análise Preliminar de Risco).

Esta etapa poderá ser precedida da elaboração de uma análise histórica de acidentes, com vista a subsidiar a identificação dos perigos na instalação em estudo (CETESB, 2003).

Os perigos podem ser identificados de acordo com:

- a) Caracterização de fontes de risco internas;
- b) Caracterização de fontes de risco externas;
- c) Análise da periculosidade das substâncias;
- d) Análise histórica de acidentes;
- e) Metodologias de Identificação de Perigos.

A Figura 2 apresenta um fluxograma de um gasoduto, identificando a fonte de risco, o objeto de risco e o impacto.



**Figura 2:** Fluxograma do risco.

### 3.3.1. Fontes de risco internas

*As fontes de risco internas podem ser classificadas como:*

- a) Linhas de transporte;
- b) Bombas e Compressores;
- c) Zonas de carga e descarga;
- d) Armazenagem;
- e) Equipamentos de processo;
- f) Serviços gerais (utilidades).

### 3.3.2. Fontes de risco externas

As fontes de risco externas podem ser classificadas como:

- a) Instalações Adjacentes;

- b) Riscos Naturais;
- c) Intrusão e Vandalismo (SABA *et al.*, 2006).

### 3.3.3. Técnicas para identificação de perigos

Várias são as técnicas que podem ser utilizadas para a identificação de perigos numa instalação industrial. Entre as diversas técnicas utilizadas para a identificação de perigos, uma das mais comumente utilizadas é a APP (Análise Preliminar de Perigo) ou APR (Análise Preliminar de Risco).

A APP - Análise Preliminar de Perigos (PHA - *Preliminary Hazard Analysis*) é uma técnica que teve origem no programa de segurança militar do Departamento de Defesa dos EUA. Trata-se de uma técnica estruturada que tem por objetivo identificar os perigos presentes numa instalação, que podem ser ocasionados por eventos indesejáveis.

Esta técnica pode ser utilizada em instalações na fase inicial de desenvolvimento, nas etapas de projeto ou mesmo em unidades já em operação, permitindo, nesse caso, a realização de uma revisão dos aspectos de segurança existentes.

A APP deve focalizar todos os eventos perigosos cujas falhas tenham origem na instalação em análise, contemplando tanto as falhas intrínsecas de equipamentos, de instrumentos e de materiais, como erros humanos. Na APP devem ser identificados os perigos, as causas e os efeitos (conseqüências) e as categorias de severidade correspondentes, bem como as observações e recomendações pertinentes aos perigos identificados, devendo os resultados ser apresentados em planilha padronizada. A Figura 3 apresenta um exemplo de planilha para a realização da APP.

PERIGO	CAUSA	EFEITO	CATEGORIA DE SEVERIDADE	OBSERVAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

Fonte: CETESB, 2003.

**Figura 3:** Exemplo de planilha para APP.

### 3.4. Caracterização da Substância Selecionada para o Estudo de Análise de Riscos

A substância selecionada para estudo é o Gás Natural, o qual é uma mistura de hidrocarbonetos (principalmente Metano); é um combustível sem cor e sem cheiro e que se caracteriza por ser mais limpo do que outros combustíveis fósseis. É uma das formas de energia mais populares nos dias de hoje. É usado para aquecer, para esfriar, para produzir eletricidade, e muitos outros usos, principalmente na indústria.

O Gás Natural é encontrado, na maioria das vezes, quando se está perfurando o solo em busca de petróleo e o mesmo é trazido para a superfície e refinado. Geralmente o gás é transportado através de gasodutos e as Fábricas e Geradoras de energia pegam o gás diretamente deste gasoduto, reduzindo drasticamente seus custos operacionais (AIChE, 2000).

Dependendo de sua origem, o Gás Natural possui os seguintes tipos (MATAR e HATCH, 2000):

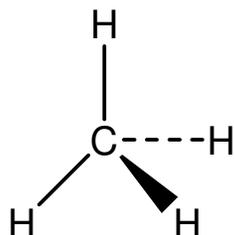
- Gás Natural Associado;
- Gás Natural Não Associado;
- Gás Natural Processado;
- Gás Natural Liquefeito.

O produto considerado no trabalho é o metano, devido à composição do Gás Natural ser aproximadamente 89% (composição típica do Gás Natural processado) de metano.

O metano possui este nome químico comum e sinônimos como Gás Natural; biogás; gás dos pântanos; hidreto de metila. Tem seu registro no *Chemical Abstract Service* (CAS) sob o número 74-82-8.

O metano é o constituinte principal do Gás Natural que é usado como combustível. Algumas vezes é chamado gás dos pântanos porque é o produto da decomposição de vegetais em condições anaeróbicas. O metano tem fórmula molecular  $\text{CH}_4$  e é o hidrocarboneto (moléculas contendo apenas carbono e hidrogênio) mais simples (ALLINGER, 1976).

A fórmula estrutural do metano está apresentada na Figura 4.



**Figura 4:** Fórmula estrutural do metano

Fonte: *Software ChemDraw Ultra – Versão 9.0.*

### 3.4.1 Características do Produto (FISPQ, 2002; HERCO, 2006)

Nome do produto: Gás Natural;

Fórmula molecular: mistura de hidrocarbonetos.

#### **a) Danos Potenciais à Saúde:**

Inalação: Por inalação pode provocar irritação das vias aéreas superiores, tosse espasmódica dor de cabeça, náusea, tonteira e confusão mental. Em altas concentrações pode levar à depressão respiratória, podendo evoluir até a morte;

Olhos: Irritação com congestão nas conjuntivas;

Pele: levemente irritante;

Ingestão: nada consta.

#### **b) Informações e Medidas de Segurança:**

Gás inflamável. Eliminar todas as fontes de ignição, impedir centelhas, fagulhas, chamas e não fumar na área de risco. Isolar os escapamentos de todas as fontes de ignição. Estancar o vazamento se isto puder ser feito sem risco. Em locais não confinados, é fácil a dispersão em caso de vazamento;

#### **c) Informações sobre riscos de Incêndio e Explosão:**

Flash Point: -182,6 °C (para metano puro);

Temperatura de auto-ignição: 482 a 632 °C;

Limites de Inflamabilidade: 4,2% (inferior); 16,22% (superior).

Meios de extinção: neblina d'água, pó químico e dióxido de carbono.

Se possível, combater o incêndio a favor do vento e extinguir com o bloqueio do fluxo de gás. Remover os recipientes da área de fogo, se isto puder ser feito sem risco. Em caso de fogo intenso em áreas de carga, usar mangueiras com suporte manejadas à distância ou canhão monitor. Se isso não for possível, abandonar a área e deixar queimar. Resfriar com neblina d'água os recipientes que estiverem expostos ao fogo, utilizando dispositivo manejado à distância, mesmo após a extinção do fogo.

OBS.: Os limites inferior e superior de Inflamabilidade foram considerados os limites referentes à mistura utilizada nos cálculos, sendo estes retirados do *Software PHAST* (Versão 6.53.1).

#### **d) Propriedades Físico-Químicas**

Estado físico: gás;

Aparência: incolor;

Odor: inodoro;

Densidade do vapor (ar =1) 0,6 – 0,81 a 20°C;

Massa molecular: 17,87 g/mol;

Ponto de ebulição: -161,4 °C a 760 mmHg (para metano puro);

Solubilidade em água solúvel: 0,4 - 2g/100g;

#### **e) Informações Toxicológicas:**

IDLH (Imediatamente Perigoso à vida e à saúde) não aplicável;

**f) Informações Suplementares NFPA** (Organização internacional de desenvolvimento de normas)

Saúde: 1;

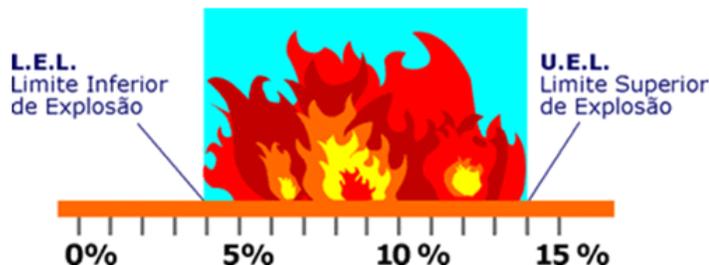
Incêndio: 4;

Reatividade: zero.

#### **g) Limites de Inflamabilidade do Gás:**

A quantidade de gás necessária para compor uma mistura explosiva com o ar depende da densidade e da composição do gás.

No caso do Gás Natural, a composição molar definirá os limites de explosão, conforme apresentado na Figura 5 (Limites de explosão do Metano,).



**Figura 5:** Limites de explosão.

Fonte: [www.pantanalenergia.com.br](http://www.pantanalenergia.com.br), 2008.

onde:

L.E.L. = Limite Inferior de explosão.

U.E.L. = Limite Superior de explosão.

O Gás Natural é considerado um asfixiante simples e seus vapores podem provocar tonturas ou sufocação. Caso ocorra a combustão, pode ocorrer a emissão de gases irritantes ou venenosos.

Acredita-se que seguidas exposições a baixas concentrações do gás (até 100 ppm no ar) não causem sinais de envenenamento ou danos permanentes.

O contato com o Gás Natural pode causar queimaduras na pele e lesões por congelamento. Tal consequência é mais provável de ocorrer nas proximidades das linhas que movimentam o produto, visto a rapidez da dispersão do gás em caso de liberação.

Em ambientes confinados com elevada concentração, o gás provoca asfixia por diminuição do oxigênio. Em concentrações menores, pode causar dor de cabeça e tonturas. Há risco de explosão em ambientes fechados ou na rede de esgoto. Pode ocorrer ignição instantânea por calor, centelhas, chama aberta ou através do seu deslocamento até uma fonte de ignição, provocando retrocesso da chama.

Ponto de fulgor bem abaixo da temperatura ambiente indica que existe perigo de fogo quando exposto à chama. Entretanto, esse perigo é reduzido devido à estreita faixa entre os limites de inflamabilidade.

Por fim, o Gás Natural é considerado um asfixiante simples e não apresenta risco toxicológico. No presente estudo, foi tratado como gás inflamável, segundo classificação da ONU (Organização das Nações Unidas) (BJERKETVEDT, 1997; HERCO, 2006).

### **3.5. Gerenciamento de Análise de Riscos**

Para aumentar o nível de segurança em duto de Gás Natural, está sendo considerado neste trabalho, como alternativa, o gerenciamento do risco baseado na avaliação quantitativa.

A avaliação quantitativa de risco recentemente tem se tornado uma importante ferramenta para o controle de segurança.

O gerenciamento de riscos usa uma gestão de experiências para ajudar a fazer julgamentos sobre o que pode acontecer no futuro. Militarmente sempre houve um grande interesse no potencial destrutivo das grandes explosões e seus danos, sendo avaliados por muitos anos (SCHARDIN, 1954 e JARRETT, 1968).

Issac (1995) utilizou técnicas da gestão de riscos para permitir ou evitar (ou para ser preparado para) erros que são cometidos facilmente. O seu trabalho inclui um número de princípios fundamentais e recomenda dez pontos chaves que devem ser considerados ao usar técnicas da gestão de riscos.

Segundo o autor os dez pontos chaves para as pessoas interessadas em desenvolver gerenciamento de riscos devem considerar:

- a) O método não é tão importante quanto o objetivo do gerenciamento do risco,
- b) Estabeleça a finalidade da análise,
- c) Tente usar uma causa e diagrama de efeito para identificar riscos,
- d) Use com cuidado a sentença para descrever cada risco,
- e) Concorde com as avaliações a serem usadas para a probabilidade e o impacto,

- f) Seja cuidadoso de acordo com avaliações da probabilidade e impacto,
- g) Avalie os impactos para o projeto inteiro,
- h) Identifique claramente disparadores para respostas da contingência,
- i) Utilize projetos reais,
- j) Inicie um projeto com uma oficina de gerenciamento de riscos.

É a aceitação e o uso destas técnicas por gestores de peritos em projeto que provará seu valor (ISSAC, 1995).

Young e Ahnb (2005) propuseram um método simples de avaliação de risco para Gás Natural em duto e introduziram os parâmetros largura e acúmulos fatais. Estes parâmetros podem ser estimados diretamente usando informações geométricas dos dutos e a densidade populacional. É sensível ao tamanho do duto, diâmetro e condições de operação. As fatalidades de um acidente são calculadas levando-se em conta o número de pessoas multiplicado com a letalidade média.

A avaliação de risco ambiental amadureceu com a descoberta de aplicações muito mais abrangentes. O foco principal de seu desenvolvimento até agora esteve nos desafios técnicos de caracterizar e de modelar o comportamento ambiental e a ação biológica dos produtos químicos, visto que as edições a respeito de seu contexto sócio-político mais amplo foram geralmente negligenciadas. A definição do problema, a análise de risco e a tomada de decisão tenderam conseqüentemente a ser dominadas por especialistas. Novas percepções das ciências sociais advogam uma aproximação pluralista, inclusiva, com os especialistas que participam ao lado de outras partes interessadas em um processo de tomada de decisão consensual (EDULJEE, 2000a, 2000b).

Na Análise Preliminar de Perigo (APP) são identificados os eventos (perigos) capazes de dar origem a acidentes nas instalações e identificadas as causas de cada um dos acidentes e suas respectivas conseqüências (efeitos), as quais dependem da evolução do acidente após a sua ocorrência.

Por meio da Figura 6 é possível visualizar os eventos capazes de dar origem a conseqüências.



**Figura 6:** Eventos capazes de dar origem a conseqüências.

Os maiores alcances para as tipologias acidentais são apresentados no Estudo de Análise Quantitativa de Riscos.

Como resultado da execução da APP (Análise Preliminar de Perigo), para manter a segurança do processo, da manutenção dos sistemas de proteção e gerenciamento de riscos existentes, foi identificado que devem ser mantidas as atividades e rotinas essenciais apresentadas a seguir.

- a) Implementar Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR);
- b) Implementar as rotinas de manutenção preventivas e corretivas;
- c) Implementar planos periódicos de inspeção / manutenção de equipamentos, linhas e acessórios.

Segundo Henselwood e Phillips (2006), quando se utiliza uma matriz de risco pré-definida e leva-se em conta riscos pré-definidos, todo o processo torna-se mais seguro devido à quantidade de risco mensurado. Para empresas e órgãos governamentais, a matriz de risco torna-se muito mais completa e o risco mitigado, tornando os esforços muito mais otimizados.

### 3.5.1 Conceitos e definições da análise de risco

Perigo é uma condição física ou química que tem potencial para causar danos às pessoas, à propriedade e ao meio ambiente.

Risco é uma exposição ao perigo, ou seja, é uma avaliação da perda econômica, humana etc, por um período de tempo.

Sendo assim:

### **Risco = Gravidade x Probabilidade**

Acidente é um evento não planejado que resulta em morte, lesão, danos ou outros prejuízos; já Incidente é um evento não previsto que tem um potencial de conduzir a acidentes.

Cenário de acidente é a hipótese acidental formulada para as situações de risco do objeto em estudo; é o conjunto formado pelo perigo identificado, suas causas e cada um dos seus efeitos.

Análise/Avaliação de Riscos é o processo através do qual os resultados das estimativas de risco são utilizados para a gestão de riscos, caracterizando-os como toleráveis ou não, através da comparação com os critérios de tolerabilidade de riscos. “Perigos não identificados constituem riscos não avaliados” (BALL e FLOYD, 1998).

A administração do risco é uma das chaves na administração de projetos (RAZ e MICHAEL, 1999). A maioria dos riscos são avaliados no processo (BACCARINI e ARCHER, 1999).

Ball e Floyd (1998) afirmam que o ideal é introduzir um procedimento de análise de risco a ser aplicado quando em projeto e apontam os níveis críticos sobre as fases de desenvolvimento realizado, usando o julgamento da engenharia. As contagens são atribuídas para:

- a) projeto conceptual,
- b) projeto,
- c) fabricação,
- d) ciclo de vida.

Segundo Wilkening e Baraldi (2007), no processo com grande diferença de pressão entre o duto e o ambiente, a liberação contínua é um processo que se torna crítico.

Em alguns cenários pode-se acompanhar uma grande quantidade de mistura inflamável. Por causa da densidade e da velocidade supersônica, as nuvens de metano ficam distantes do chão ou construções, reduzem a probabilidade de

ignição e reduz o processo de aceleração da chama. Resultados provenientes do vento também são descritos nos cenários.

É possível através de métodos fazer simulações levando em conta também o ambiente, com ou sem vento.

Especialmente no caso de liberação de metano, fica mais perigoso sem vento do que com vento, desde que algumas misturas inflamáveis fiquem confinadas em um ambiente como zonas entre prédios. Como estas áreas são estáveis e próximas ao chão e construções, é possível uma ignição neste tipo de cenário.

Wilkening e Baraldi (2007) em seu estudo realizaram comparações de risco com relação a dutos de metano e hidrogênio. Concluíram que as quantidades totais de energia térmica do metano e hidrogênio são semelhantes quando operados em dutos pressurizados e com mesmo diâmetro. A quantidade de mistura inflamável é muito maior no caso de vazamento de hidrogênio, pois o limite máximo de inflamabilidade do hidrogênio é maior do que do metano. A taxa entre a quantidade total inflamável e a taxa liberada parece depender mais do tipo de gás e do limite de inflamabilidade do que da liberação no cenário.

Os mesmos autores apresentaram em seu trabalho que, por causa da diferença de densidade, efeitos de flutuação são mais fortes no caso do hidrogênio do que do metano. A velocidade sônica do hidrogênio é muito maior do que a do metano. Estas duas propriedades físicas causam um menor acúmulo de hidrogênio do que de metano em regiões fechadas em nível do solo. No nível do solo ou perto de construções, a ignição é mais provável. Ainda, se uma explosão ocorrer na presença de obstáculos próximos do solo, pode-se aumentar a aceleração da chama.

Por causa do número limitado de simulações realizadas, não foi possível avaliar se a alta inflamabilidade do hidrogênio é compensada pelo fato de que o hidrogênio tende a escapar mais rapidamente do nível do solo que o metano, sendo assim, mais investigações são necessárias. Para determinar mais assertivamente quando o duto de hidrogênio poderia causar um risco maior de explosão do que dutos de metano, uma análise de risco é necessária e isso vai além do escopo do trabalho dos autores (WILKENING e BARALDI, 2007).

Dziubinski *et al.* (2006) apresentaram uma metodologia de análise de riscos para perigos associados com transporte de substâncias perigosas ao longo dos dutos, a qual contemplou uma seqüência de análises e cálculos utilizados para determinar as razões básicas de falhas de dutos e suas prováveis conseqüências, levando em conta o risco social e individual. Uma característica específica desta metodologia é uma combinação das técnicas qualitativa e quantitativa, as quais oferecem uma possibilidade de avaliação plena do risco. Isto habilita a análise detalhada do risco associado com fontes perigosas selecionadas por técnicas quantitativas. Para avaliar a metodologia, os autores realizaram uma análise de riscos completa para dutos de combustíveis de longa distância na Polônia.

Os estágios seqüenciais da análise de risco são considerados dando uma atenção especial para aplicação de técnicas e modelos de cálculos (WIEKEMA, 1980).

Os autores descobriram em seu estudo que perigos associados ao ambiente por dutos longos requererem uma atenção especial em cada caso. Isto é determinado principalmente por uma específica mudança na posição do duto. Isso atribui particularidades para o cálculo de conseqüências de vazamento de substâncias perigosas para os ecossistemas particulares (água, ar e solo). Um computador é requerido para auxiliar na eficiência de aquisição de dados no processo de armazenamento e processamento de cada estágio de risco. Os *Softwares* disponíveis são PHAST e EFFECTS os quais permitem modelar as conseqüências de liberações perigosas emanadas do duto. Entretanto, a implementação prática destes *Softwares*, e especialmente interpretação dos resultados das simulações, requer competência em análises de risco.

Eduljee (2000b) apresenta uma conexão entre a análise de risco e o gerenciamento de riscos. O autor reconhece a necessidade para a tomada de decisão participativa na análise/avaliação e no gerenciamento de riscos. Apresenta um deslocamento de uma estrutura mais adiantada para a gestão de riscos no contexto da política ambiental nos países baixos.

A caracterização exata dos efeitos à saúde associados com a exposição a substâncias perigosas é um elemento chave no processo de análise de risco (CHOU *et al.*, 2001; TWEEDDLE, 1989).

### 3.5.2 Ferramentas para análise de risco

Para executar a análise de risco e a avaliação do nível de risco de acidente, três métodos, qualitativo, semi-quantitativo e quantitativo, podem ser usados. As ferramentas principais usadas com esta finalidade são HAZOP (Estudo de Perigos e Operabilidade), PHA (Análise de Perigos de Processo) e métodos *WHAT IF (e se)* (HERCO, 2008).

Os métodos qualitativos são usados, antes de mais nada, na verificação da concordância de um nível de segurança com os princípios válidos contidos em regulamentos legais e em padrões. Estas réguas geralmente referem-se a dispositivos separados e representam as exigências mínimas que devem ser satisfeitas para alcançar algum nível de segurança aceitável. Entretanto, para encanamentos longos, exige-se freqüentemente que a análise de risco seja feita usando-se técnicas probabilísticas quantitativas baseadas no conceito de risco. A avaliação de risco quantitativa é composta por uma série de análises e de cálculos complexos que empregam, em muitos casos, a simulação numérica, particularmente na análise de efeitos físicos. Uma análise de risco completa de um objeto selecionado é uma tarefa complexa que exige o uso de *Software* específico (PHAST, EFFECT e SAFETI) e treinamentos intensivos na teoria e prática de análise de risco para a interpretação correta destes resultados (TWEEDDLE, 1989; HERCO, 2008; DZIUBINSKI *et al.*, 2006).

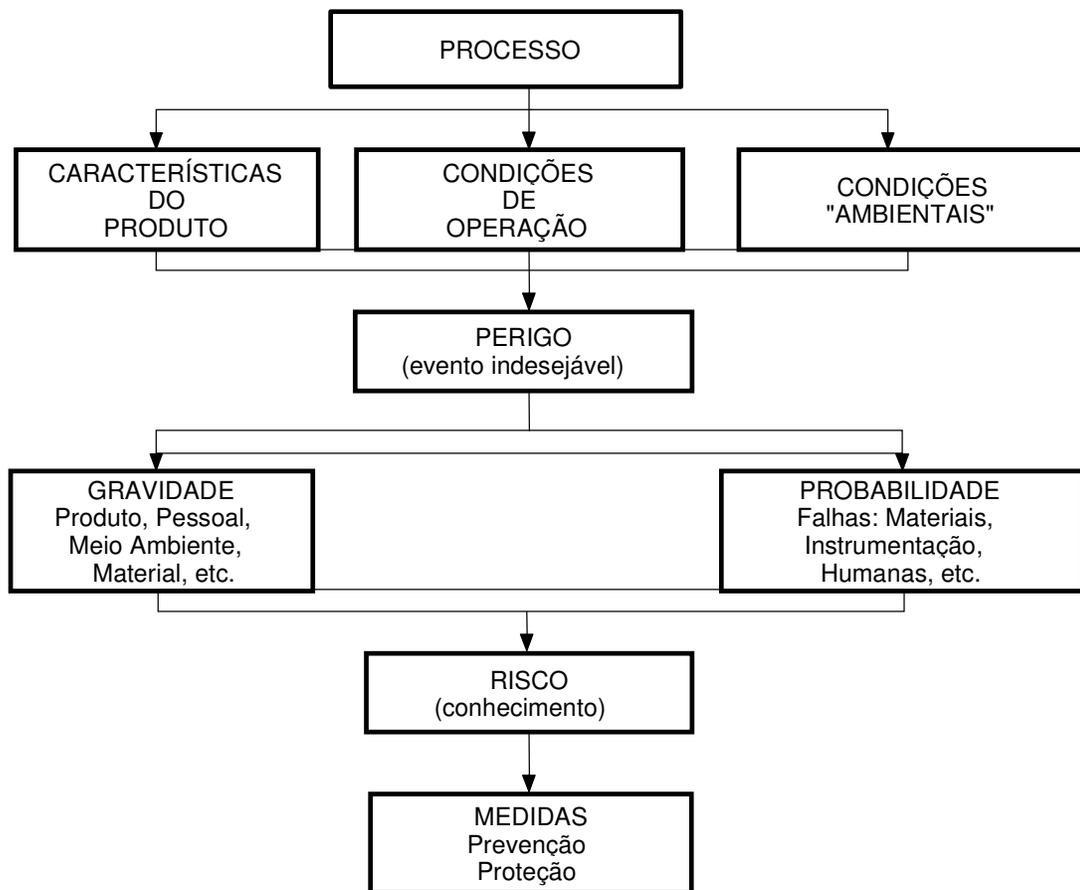
Um das ferramentas mais utilizadas é o CFD (Computational Fluid Dynamics). Com esta ferramenta é possível investigar os efeitos de diferentes propriedades (densidade, difusividade, viscosidade e limites de inflamabilidade) no processo de dispersão. Com esta ferramenta é também possível estudar a influência de diferentes cenários, configurações geométricas e condições atmosféricas. Um vazamento acidental no duto é modelado e simulado como um fluxo através de um pequeno furo entre a alta pressão do duto e o ambiente (WILKENING e BARALDI, 2007).

O desafio dos próximos anos será embutir o uso da ciência na análise de risco e gerenciamento de risco como uma ferramenta sócio-política, a ser utilizada no processo de decisão da natureza e no processo de decisão do homem (EDULJEE, 2000a).

### 3.5.3 Processo de análise de risco

O processo para analisar o risco envolve vários fatores operacionais, climáticos e ambientais. Estas características podem gerar um evento indesejável podendo se agravar de acordo com a sua severidade e probabilidade. Conhecendo o risco envolvido no processo, pode-se tomar medidas de prevenção e proteção (LEES, 1996; FRANK e LEES, 1996; ISAAC, 1995).

A Figura 7 apresenta o fluxograma do processo para analisar o risco.



**Figura 7:** Fluxograma do processo para analisar o risco.

### 3.5.4 Distâncias a serem consideradas

Para cada cenário acidental estudado, as distâncias a serem apresentadas deverão sempre ser consideradas a partir do ponto onde ocorreu a liberação da substância.

Para o evento explosão não confinada de nuvem de vapor na atmosfera, a distância a ser considerada para os níveis de 0,1, 0,3 bar e 0,4 bar de sobrepressão deverá ser aquela fornecida pelo modelo de cálculo da explosão utilizado, acrescida da distância equivalente ao ponto médio da nuvem inflamável.

Para o evento explosão confinada, a distância a ser considerada, para os citados níveis de sobrepressão, deverá ser aquela fornecida pelo modelo de cálculo utilizado, medida a partir do centro do recipiente em questão. Quando for utilizado o modelo de Multi-Energia, o ponto da explosão deverá ser o centro geométrico da área parcialmente confinada (CETESB, 2003).

### 3.5.5 Critérios utilizados para avaliação da análise de riscos

Nos estudos de análise de riscos, deverão ser utilizados dados meteorológicos reais do local em estudo.

Segundo o manual da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 2003), quando as informações meteorológicas reais não estiverem disponíveis, deverão ser adotados os seguintes dados:

**Período diurno:**

- a) Temperatura ambiente: 25 °C;
- b) Velocidade do vento: 3,0 m/s;
- c) Categoria de estabilidade atmosférica: C;
- d) Umidade relativa do ar: 80 %;

**Período noturno:**

- e) Temperatura ambiente: 20 °C;
- f) Velocidade do vento: 2,0 m/s;

g) Categoria de estabilidade atmosférica: E;

h) Umidade relativa do ar: 80 %;

### 3.5.6 Exposição ao risco

O risco que o gasoduto gera tem que ser menor do que o risco que a população está exposta naturalmente, conforme apresentado na Tabela 1. A Tabela 1 mostra a probabilidade, por exemplo, de 3,4 pessoas a cada mil pessoas expostas de apresentarem doenças do coração; a probabilidade de 7,7 pessoas a cada 1 milhão de pessoas expostas de sofrerem envenenamento com gás, etc.

**Tabela 1:** Limites de exposições.

CAUSA	PROBABILIDADE
Doença do Coração	$3,4 \times 10^{-3}$
Câncer	$1,6 \times 10^{-3}$
Todos os Acidentes	$4,8 \times 10^{-4}$
Acidentes do Trabalho	$1,5 \times 10^{-4}$
Veículos Automotivos	$2,1 \times 10^{-4}$
Homicídios	$9,3 \times 10^{-5}$
Quedas	$7,4 \times 10^{-5}$
Afogamentos	$3,7 \times 10^{-5}$
Queimaduras	$3,0 \times 10^{-5}$
Envenenamento Líquido	$7,0 \times 10^{-5}$
Sufocamento	$1,3 \times 10^{-5}$
Acidentes com Armas	$1,1 \times 10^{-5}$
Trens	$9,0 \times 10^{-6}$
Aviação Civil	$8,0 \times 10^{-6}$
Transporte Marítimo	$7,8 \times 10^{-6}$
Envenenamento com Gás	$7,7 \times 10^{-6}$

Fonte: HERCO, 2008.

### 3.6. Análise de Conseqüências

A Análise de Conseqüências é uma ferramenta usada durante a Análise de Riscos para a avaliação dos efeitos de cenários acidentais (vazamento de produtos inflamáveis e/ou tóxicos) (BRITO e ALMEIDA, 2008; HENSELWOOD e PHILLIPS, 2006). Estes cenários são avaliados através de modelagens matemáticas mediante a utilização de *Softwares*. Um software bastante utilizado é o *Software* PHAST (versão 6.53.1), desenvolvido pela DNV Technica e conhecido mundialmente pelo seu elevado índice de confiabilidade, sendo o mesmo utilizado pela PETROBRAS.

#### 3.6.1. Etapas do Estudo de Análise de Conseqüências

- a) Identificação do cenário.
- b) Coleta de dados.
- c) Digitalização de mapas.
- d) Processamento dos dados obtidos.
- e) Comparação dos resultados com padrões de referências internacionais.
- f) Análise dos resultados.
- g) Elaboração de relatório, contendo a análise de conseqüências realizada.
- h) Através de simulações de vazamentos, prever conseqüências de:
  - explosões
  - incêndios
  - efeitos tóxicos {
    - leve irritação
    - lesão
    - morte

Investigações de acidentes reais em gasodutos de Gás Natural mostram que as conseqüências são dominadas por algumas encenações do acidente, tais como a explosão e o fogo do jato (YOUNG e AHNB, 2005; BRITO e ALMEIDA, 2008; HENSELWOOD e PHILLIPS, 2006). A possibilidade de um fogo instantâneo significativo resultar da ignição remota atrasada é extremamente baixa devido à

natureza flutuante do vapor, que impossibilita geralmente a formação de uma persistente nuvem do vapor ao nível do solo (ZEEUWEN *et al.*, 1983; VAN DEN BERG *et al.*, 1987). A explosão ilimitada da nuvem do vapor do metano produz a sobrepressão insignificante com a flama que viaja através de uma mistura do gás e do ar. Se o ponto de ruptura é próximo a um edifício, o gás escapado migraria para dentro do edifício e faria uma explosão confinada pela ignição (YOUNG e AHN, 2005).

Serão apresentadas as etapas do processo que dão origem a uma explosão de nuvem de gás, decorrente de uma liberação acidental, conforme a descrição contida no “Yellow Book” (TNO, 2005), desde a formação da nuvem até a sua queima. A forma como ocorre o vazamento, os obstáculos presentes no local e o tipo de liberação de energia são fatores que influenciam na dispersão do gás inflamável na atmosfera e na queima, afetando na intensidade do dano causado às pessoas, como por exemplo, ruptura de tímpanos e a estruturas, como colapso de estruturas próximas do evento.

Segundo o manual da CETESB (2003), os limites para efeitos mecânicos são apresentados na Tabela 2:

**Tabela 2:** Limites para os efeitos térmicos e mecânicos.

Efeito	(bar)		
	Sobrepressão (*)	0,1	0,3

(\*) Efeitos após 30 min. ou 60 min.

Os alcances dos danos considerados para as substâncias inflamáveis estão relacionados com os seguintes valores referência:

- a) Limite inferior de inflamabilidade ..... 100% de letalidade.
- b) Sobrepressão de 0,1 bar..... 1% de letalidade.
- c) Sobrepressão de 0,3 bar..... 50% de letalidade.
- d) Sobrepressão de 0,4 bar..... 99% de letalidade.

### 3.6.2. Formação da nuvem de gás

A formação de uma determinada nuvem inflamável pode ser uma consequência de um vazamento de gás ou líquido volátil, proveniente de um tanque de processo, armazenagem ou de transporte e até mesmo de linhas de transferência, como por exemplo, um rompimento de um duto, conexão ou válvula. Os vazamentos acidentais podem ser classificados como contínuos e instantâneos, e o processo pelo qual ocorre o espalhamento da nuvem, enquanto esta se dilui na atmosfera, é denominado de dispersão atmosférica (BRITO e ALMEIDA, 2008; HENSELWOOD e PHILLIPS, 2006).

Com relação ao tempo de duração de um vazamento, o instantâneo caracteriza-se por ser uma liberação que ocorre num curto espaço de tempo, como por exemplo, o rompimento de um reservatório isolado onde a massa total contida nele formaria a nuvem; normalmente, rupturas catastróficas são consideradas como vazamentos instantâneos. Já os vazamentos contínuos têm uma liberação mais duradoura quando comparados aos instantâneos e podem ter sido gerados por uma ruptura de uma tubulação de alimentação e de distribuição, seja de gás ou de líquido, tendo sua massa liberada dependente do tempo de duração entre o início do vazamento, detecção e término, seja por esgotamento ou estancamento por uma válvula de controle. É importante salientar que os vazamentos contínuos podem ser constantes e transientes (AIChE, 2000).

O processo pelo qual ocorre a dispersão atmosférica é dependente do tempo que a substância liberada na forma de gás leva para se diluir na atmosfera antes de entrar em ignição. Este fenômeno também pode ser um fator determinante na forma de ocorrência da explosão, uma vez que a mistura com o ar só se torna inflamável se a concentração do combustível se encontrar entre os limites inferior (L.E.L.) e superior (U.E.L.) de inflamabilidade. Nos processos de dispersão com vazamentos contínuos e constantes, tem-se a formação de nuvens constantes após certo período de tempo e, para os vazamentos contínuos e transientes, tem-se nuvens disformes até que a massa adicionada à nuvem seja compensada pela massa dispersada na atmosfera, ou seja, atinja o seu tamanho de equilíbrio; após este período, a nuvem se torna constante.

A dispersão de uma nuvem depende também de suas características físico-químicas e do ambiente, tais como a densidade do gás, temperatura ambiente, velocidade e direção do vento na região onde se tem o vazamento, classe de estabilidade atmosférica, confinamento e obstruções ao escoamento da nuvem (AIChE, 2000).

### 3.6.3. Tipos de fonte de energia

Há na literatura diversas explicações sobre o conceito de uma explosão. Uma explosão pode ser definida como uma violenta e repentina liberação de energia (LEES, 1996; FRANK e LEES, 1996), ou então, como uma rápida expansão de um gás pressurizado em que a energia resultante da liberação é dissipada na forma de onda de choque (AIChE, 2000).

O fenômeno ocorre com uma liberação de energia em um volume reduzido e em um intervalo de tempo muito curto, resultando numa expansão súbita contra o ar atmosférico com um aumento de pressão na região de ocorrência, que tem como consequência a geração de uma onda de choque. Entretanto, quando a queima da nuvem é feita de forma lenta e progressiva, tem-se um incêndio em nuvem ou *Flash Fire*, que se dá usualmente em regiões não confinadas e desobstruídas, gerando sobrepressão desprezível.

Em uma explosão, o aumento de pressão pode ser gerado de diversas formas:

- a) Pela despressurização de gás armazenado à pressão suficientemente acima da atmosférica;
- b) Pela expansão dos gases resultantes da combustão rápida de uma mistura explosiva;
- c) Pela liberação de energia proveniente de uma reação química ou nuclear;
- d) Por mudança de fase de gás liquefeito ou de líquido pressurizado em temperatura acima do seu ponto de ebulição.

O que diferencia uma explosão de um incêndio com geração de onda sonora é a forma como se dá essa liberação de energia. Se a energia acumulada por um gás sob pressão em um reservatório for lenta e progressivamente liberada por um

vazamento, o máximo que se obterá será o som produzido pela onda de pressão resultante. Já se o reservatório perder repentinamente sua integridade e liberar o gás quase instantaneamente, a onda de pressão produzida não será mais uma onda sonora e sim uma onda de choque de pressão. Esta onda de choque de pressão viajará a uma velocidade igual ou superior a do som no gás não perturbado, atingindo pessoas presentes na região e causando danos a toda e qualquer estrutura próxima onde a explosão ocorreu.

Existem três tipos básicos de fontes de liberação de energia que podem ocorrer no processo explosivo: a energia física, química e nuclear.

A energia física é caracterizada como energia de pressão no caso de gases, energia de tensões em metais, elétrica e térmica (LEES, 1996; FRANK e LEES, 1996). Pode-se citar como exemplos de explosões formadas por liberação de energia física, uma explosão de um vaso devido à elevada pressão em que o gás se encontra e uma súbita ruptura de um vaso originada por uma fratura frágil. Fontes de energia química derivam das reações químicas. Explosões com liberação violenta de energia química são, por exemplo, aquelas que ocorrem em nuvens devido à combustão de um gás inflamável. Explosões com liberação de energia nuclear são resultantes de reações envolvendo rompimento nuclear dos átomos.

#### 3.6.3.1 *Queima de nuvem e propagação da chama*

Conforme foi mencionado, a queima do vapor ar-gás inflamável ocorre somente na região inflamável da nuvem, ou seja, naquela em que a concentração da mistura encontra-se entre os limites de inflamabilidade.

Para que aconteça a reação de combustão, necessita-se de uma energia de ativação mínima para iniciar a reação e também para que esta se propague pela nuvem. A energia de ativação permite que os reagentes da mistura alcancem a temperatura de ignição, ou até mesmo uma temperatura maior, variando de acordo o tipo de combustível e a concentração em que este se encontra na mistura. Assim, quanto menor for a energia de ativação mínima para ocorrer a combustão, mais reativo é o combustível (AIChE, 2000).

Na propagação da reação na fração não queimada, seja induzida termicamente ou mecanicamente, podem ser constatados dois processos de queima de vapor: a deflagração e a detonação.

Chama-se deflagração o processo de queima em que a velocidade da frente da chama se propaga com velocidade subsônica na direção da mistura não queimada, limitada pela difusão molecular de calor e massa (BJERKETVEDT, 1997). Ocorre em reações realizadas a baixas pressões, não sendo superiores a 2 atm, em caso de ausência de confinamento, onde a velocidade de propagação não ultrapassa 4 m/s (AIChE, 2000).

Por se propagar a uma velocidade baixa, a frente da chama é classificada como frente laminar. A deflagração também pode se tornar turbulenta em condições especiais, ocorrendo a transição para a detonação.

A detonação é o processo de queima em que a velocidade da frente da chama viaja acima da velocidade do som, onde a reação explosiva ocorre pela passagem de onda de choque na direção da mistura não queimada. Devido ao fato da queima ser realizada a uma velocidade alta, tem-se a geração de picos de sobrepressão elevados.

A transição da deflagração para uma detonação surge quando há fatores que induzem a turbulência e aumentam a velocidade propagação da chama como a presença de obstáculos no volume ocupado pela mistura e o grau de confinamento (LEES, 1996).

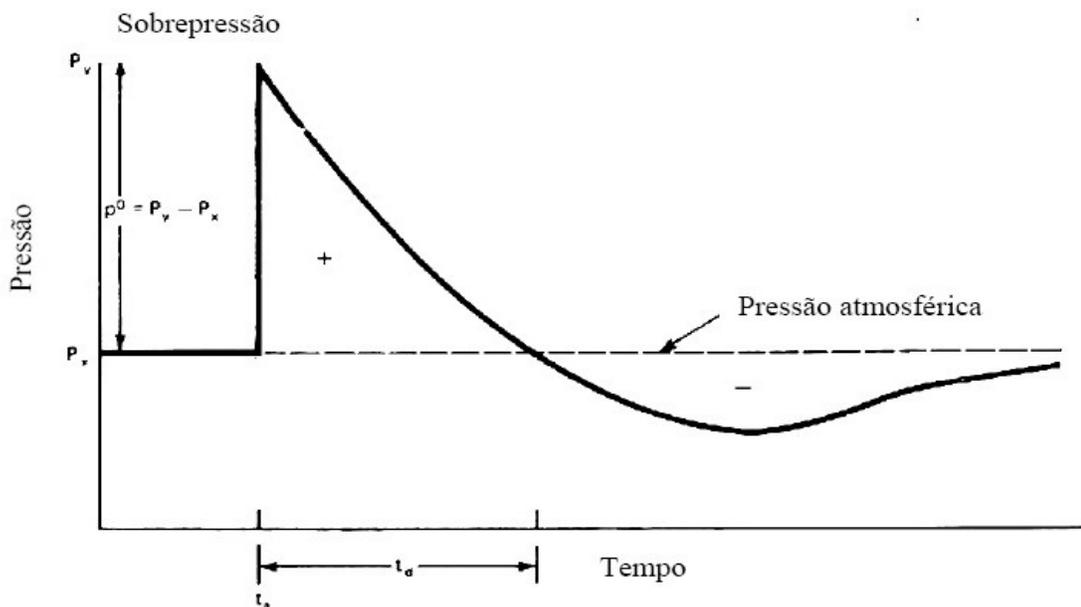
Esta velocidade, na detonação, é uma função da velocidade da onda de choque que a precede e viaja acima da velocidade do som e é influenciada pelos seguintes fatores: características químicas do combustível, onde a velocidade é proporcional à reatividade da substância; a proporção da mistura, em que a velocidade é máxima para misturas estequiométricas; o tipo de frente da chama, sendo que frentes turbulentas têm velocidades maiores, pois há formação de vórtices que causam aumento da área de troca térmica, aumentando por consequência a quantidade de mistura queimada; o confinamento, no qual há restrições no sentido da propagação da chama, aumentando a pressão; e obstruções, que geram frentes turbulentas que são mais comuns em regiões

congestionadas, por exemplo, a presença de tubulações e equipamentos na região ocupada pelo volume da mistura.

### 3.6.3.2 Onda de choque

Sempre que se produz um aumento súbito de pressão na atmosfera, tem-se a formação de uma onda de pressão que se propaga no meio. De acordo com a intensidade da geração da onda, ela pode ser classificada em dois tipos: as ondas de compressão, em que ocorre apenas um aumento progressivo da pressão e ondas de choque, onde há um aumento abrupto da pressão com deslocamento a velocidades superiores à velocidade do som. Como a velocidade do som é dependente da relação  $C_p/C_v$ , razão entre as capacidades caloríficas do gás à pressão e volume constante, e da temperatura, a velocidade de propagação da onda também é dependente destes parâmetros.

As ondas de choque são caracterizadas como um aumento súbito de pressão em áreas adjacentes à explosão com um tempo de duração de 1 a 5 milissegundos e de espessura da ordem do livre caminho médio das moléculas no ar de  $10^{-8}\text{m}$  (BJERKETVEDT, 1997). A Figura 8 mostra o comportamento da pressão de uma onda de choque que seria observada em um ponto a uma certa distância do centro da explosão de uma nuvem de vapor inflamável.



**Figura 8:** Variação da pressão e fases de uma onda choque (TNO, 1997).

Os parâmetros da onda de choque apresentada na Figura 8 são:

- a) Pico de sobrepressão ( $P_o$ ) – é o maior valor de pressão acima da pressão atmosférica.
- b) Período de pressão subatmosférica – período em que o valor da pressão da onda de choque é menor que a pressão atmosférica. Ocorre devido à inércia dos gases em expansão.
- c) Tempo de duração da fase positiva ( $t_d$ ) – é o tempo da passagem da onda de choque do ponto em estudo até o instante em que o valor da pressão atinja a pressão atmosférica.
- d) Tempo de chegada ( $t_a$ ) – é o tempo transcorrido desde o início da ignição até que a onda chegue ao ponto em estudo.

A determinação da variação espacial e temporal da carga produzida pela explosão não é trivial. Existem vários métodos para estimar a sobrepressão produzida pela explosão de uma nuvem gasosa, entre eles o método Multi-Energia (TNO, 2005), que se caracteriza por permitir levar em conta a influência das obstruções do cenário estudado. Este método propõe uma série de expressões que permitem determinar a curva de sobrepressão em função do tempo, a partir de uma concentração estimada da mistura explosiva, a qual é função do tipo de gás e do grau de confinamento do mesmo, assim como das condições de pressão e temperatura ambientais.

A partir de curvas normalizadas propostas pelo método (confeccionadas utilizando métodos numéricos), é possível avaliar a forma da curva de sobrepressão em função do tempo para uma determinada distância. Esta curva tem uma variação exponencial conhecida, que se ilustra na Figura 8, sendo caracterizada basicamente por dois parâmetros: a sobrepressão incidente máxima,  $p_s$ , e o tempo de duração da fase positiva da curva,  $t_d$ .

A explosão produz também uma pressão dinâmica resultante do vento produzido pela onda de choque. Todos estes fatores são estimados através do método Multi-Energia (TNO, 2005). Em AIChE (2000) estão apresentadas as curvas e expressões que permitem determinar estes valores para as geometrias mais comuns.

Ferreira (2005) realizou em seu estudo os cálculos em caso de explosão de propano com características similares as aqui apresentadas.

### **3.7. Análise Histórica de Acidentes**

A análise histórica de acidentes tem por objetivo estudar e analisar acidentes com o fim de identificar situações de risco (causas e conseqüências) que podem ocorrer na instalação em estudo.

Efetua-se uma análise do histórico específico de acidentes ocorridos com as substâncias químicas perigosas classificadas em processos e equipamentos similares aos que se encontram na instalação analisada.

Existem várias fontes de dados para a estimativa de análise histórica de acidentes como, por exemplo, o *European Gas Pipeline Incident Data Group* (EGIG, 1999) e *BG Transco* (API, 2000).

Muitos trabalhos realizam a análise histórica baseada na Base de Dados MHIDAS (*Major Hazards Incident Data Service*), base de dados de reconhecido prestígio pertencente ao *Health and Safety Executive Safety and Reliability Directorate* da *United Kingdom Atomic Energy Authority* (HERCO, 2008).

#### **3.7.1. MHIDAS (Major Hazard Incident Data Service)**

O *Major Hazard Incident Data Service* foi criado pelo HSE - *Health and Safety Executive* (BALL e FLOYD, 1998; HILL e CATMUR, 1994). O MHIDAS é um banco de dados que registra as ocorrências de acidentes, em nível mundial, e as classifica em 14 campos. Os registros compreendem incidentes envolvendo substâncias perigosas no transporte, armazenamento e processo que tiveram conseqüências, ou potencial para, afetar pessoas no empreendimento, à comunidade e ao meio ambiente. Estes registros foram coletados por um período de mais de trinta anos.

A pesquisa na base de dados pode ser efetuada por:

- a) Substâncias perigosas

- b) Atividades: Armazenagem, cargas/descargas de produto, processos
- c) Combinações de ambas

O resultado são conjuntos de registros com diversos campos, entre os quais estão:

- a) Tipo de Acidente
- b) Causa do Acidente
- c) Fontes de ignição (no caso de incêndios e explosões).

Para se efetuar uma análise histórica de acidentes em instalações idênticas, ou seja, equipamentos de processos que manipulam grande quantidade de produtos derivados de petróleo (especificamente Gás Natural), é necessário primeiramente avaliar as fontes de dados existentes e as considerações que serão adotadas no trabalho.

As fontes dados existentes podem ser nacionais ou internacionais e fornecem informações relativas a ocorrências de acidentes relacionando estas com suas respectivas causas e tipologia (HERCO, 2007; SERPA, 2002).

### 3.7.2. Resultados e avaliação do banco de dados

Pelo MHIDAS (*Major Hazard Incident Data Service*) foram identificados 314 registros relativos a acidentes envolvendo Gás Natural, abrangendo gasodutos e redes de distribuição.

O banco de dados MHIDAS apresenta detalhes sobre mais de 7 (sete) mil acidentes que ocorreram durante o transporte, o processamento ou armazenamento de produtos perigosos com potencial para causar ou que resultaram em impactos externos às instalações.

Esta definição inclui acidentes que ocorreram casualmente, requereram evacuação de pessoas tanto nas instalações, quanto na parte externa das instalações ou causaram danos às propriedades ou ao meio ambiente, juntamente com incidentes que poderiam ocorrer, mas por ações tomadas foram contidos antes de ocorrer. Alguns tipos específicos de acidentes, tais como envolvendo materiais

radioativos, por exemplo, são excluídos deste banco de dados (OFFSHORE TECHNOLOGY REPORT, 1999).

Para avaliação dos dados no MHIDAS (*Major Hazard Incident Data Service*), desenvolvido pela AEA *Technology*, podem-se dividir os dutos em duas categorias: transporte de gás, onde as pressões são altas (maiores que 17 bar), e redes de distribuição, que operam com pressões menores (entre 7 a 12 bar).

Com relação a acidentes envolvendo produtos inflamáveis na área de processo, foram registrados um total de 1809 acidentes, possuindo a distribuição de causas iniciadoras mostradas na Tabela 3.

**Tabela 3:** Causas iniciadoras.

Causa Iniciadora	Distribuição (%)
Falhas Mecânicas	22
Falhas em tubulações, válvulas, flanges.	5
Erros de Operação/manutenção	13
Causas Externas	2
Indeterminada	58

A Tabela 4 apresenta a distribuição percentual das tipologias acidentais dos acidentes registrados pelo MHIDAS.

**Tabela 4:** Tipologia acidental.

Tipologia Acidental	Distribuição (%)
Incêndio	54
Explosão	40
Vazamento sem ignição	6

Ressalta-se que nesta distribuição das causas iniciadoras não foi analisado apenas Gás Natural, mas sim vários produtos inflamáveis. Os produtos inflamáveis considerados para a análise das causas iniciadoras estão descritos na Tabela 5.

**Tabela 5:** Principais Produtos envolvidos nos acidentes.

<b>Produto</b>	<b>Número de acidentes</b>
Cru	464
Etileno	115
Gás Natural	60
Gasolina	45
Propano	37
GLP	34
Nafta	33
Hexano	21
Tolueno	18
Estireno	14
Butadieno	13
Metano	12
Óleo Diesel	11
Querosene	8
Etanol	6

### 3.7.3. Alguns dos grandes acidentes que enfatizam a importância da Análise de Risco (HERCO, 2007).

Em 06 de março de 2002, ocorreu uma explosão em uma Estação de Compressão de Gás Natural em Oklahoma, nos Estados Unidos, deixando duas pessoas feridas. O acidente ocorreu em uma estação de compressão de processamento de Gás Natural na parte danificada do prédio, onde ocorreu chama e dispersão de gás. Houve explosões. Havia escolas próximas às instalações e os funcionários foram evacuados do local (FERREIRA, 2005; SERPA, 2002).

Em 26 de setembro de 1997, ocorreu uma explosão em uma Estação de Compressão de Gás Natural na Rússia, devido à falha humana e falha mecânica, deixando 21 pessoas feridas. A origem do acidente deu-se no gasoduto que estava desgastado.

Em 24 de Junho de 1997, ocorreu um incêndio em uma unidade de compressão de gás no Kuwait, na área de estação de bombeamento matando uma pessoa. O incêndio foi controlado aproximadamente em uma hora.

Em 16 de março de 1994, ocorreu uma explosão em uma Estação de Compressão de Gás Natural devido à falha mecânica na bomba. Esse acidente ocorreu na cidade de Bashkortostan na Rússia, não havendo pessoas feridas.

Em 04 de julho de 1978, houve uma explosão em uma Estação de Compressão de Gás Natural na Alemanha; os danos deixados pela explosão foram catastróficos, deixando duas pessoas feridas e duas pessoas mortas.

Ao analisar todos os acidentes ocorridos, observou-se que a grande maioria foi devido à falha mecânica ou instalações antigas.

a) REDUC (Refinaria Duque de Caxias)

No dia 30 de março de 1972, houve a explosão de uma esfera de GLP, na REDUC (Refinaria Duque de Caxias), que chegou a lançar fragmentos até o centro da cidade de Duque de Caxias. Oficialmente, foram registrados 42 mortos. Após o acidente, a Refinaria adaptou a produção a novas rotinas de prevenção a acidentes industriais; mesmo assim os acidentes persistem até hoje.

A causa principal do acidente foi o congelamento da válvula de drenagem da esfera de GLP, após a passagem de gás pela mesma. Com isso, formou-se uma nuvem de GLP que se dispersou até encontrar uma fonte de ignição, formando um incêndio na parte inferior da esfera. Com o aquecimento da mesma, e conseqüente aumento da pressão interna, a válvula do tipo PSV abriu, liberando GLP para a atmosfera. Porém, esse escape de gás também atingiu a ignição, deixando a esfera em meio a um incêndio completo, aquecendo o material da esfera e o GLP armazenado. Após alguns instantes, a pressão aumentou mais que o suportado pela esfera, que se rompeu, dando vez à ocorrência de um cenário de BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion), que impactou em outras esferas e outras áreas da planta.

Atualmente, medidas de segurança como dupla válvula de drenagem diminuem a freqüência de ocorrência de novo acidente como esse.

#### b) Refinaria de Cubatão

Uma das maiores tragédias de Cubatão (Vila Socó - Cubatão) ocorreu por volta das 22h30min do dia 24/02/1984. Moradores da Vila Socó (atual Vila São José), Cubatão/SP, perceberam o vazamento de gasolina em um dos oleodutos da PETROBRAS, que ligava a Refinaria Presidente Bernardes (RPBC) ao Terminal de Alemoa.

A tubulação passava em região alagadiça, em frente à vila, constituída por palafitas. Na noite do dia 24, um operador iniciou a transferência de gasolina para uma tubulação fechada, gerando sobrepressão e ruptura da mesma, espalhando cerca de 700 mil litros de gasolina pelo mangue.

Com a movimentação das marés, o produto inflamável espalhou-se pela região alagada e, cerca de 2 horas após o vazamento, aconteceu a ignição seguida de incêndio.

O fogo se alastrou por toda a área alagadiça superficialmente coberta pela gasolina, incendiando as palafitas. O número oficial de mortos é de 93, porém algumas fontes citam um número extra-oficial superior a 500 vítimas fatais, dezenas de feridos e a destruição parcial da vila.

#### c) REGAP (Refinaria Gabriel Passos)

Um incêndio ocorrido em 27 de dezembro de 1998 às 11h30min na refinaria de petróleo da Petrobras (REGAP) em Betim (MG) provocou a morte de um operário e queimaduras em outros 11 que trabalhavam em uma unidade de querosene.

Foi informado que houve um vazamento de nafta que era utilizada para colocar em operação a unidade de hidrotreatamento de querosene, que estava em manutenção. A nafta pode ter incendiado por vários motivos, entre eles o simples fato de haver algum ponto quente nas tubulações em função da luz solar.

#### d) P-36 (Plataforma)

No dia 15 de março de 2001, estavam 175 trabalhadores a bordo da P-36, quando, às 0h22min, houve uma explosão. Por volta das 0h50min, nova explosão provocou a morte de 11 brigadistas. No dia 20 de março submergiu completamente.

Soube-se que não houve culpados e tudo se deu por um defeito em uma válvula. Mas várias investigações apontaram responsabilidade e atribuíram tanto a explosão quanto o afundamento da plataforma a falhas de procedimentos adotados mesmo antes da liberação da operação da P-36 como falhas no projeto, planejamento e gerenciamento de riscos (Acidente em empresa petroquímica, [www.folha.uol.com.br](http://www.folha.uol.com.br), 2008).

#### e) Nigéria

Nos arredores de Lagos (26/12/2006), a capital econômica da Nigéria, ocorreu uma explosão de um gasoduto depois de um aparente roubo de combustível. Ainda que a cifra de mortes seja incerta, as diversas informações falam de várias centenas de mortes.

Conforme a Cruz Vermelha, o número de mortes registradas atingiu 200, enquanto Akintunde Akinleye, um fotógrafo da agência Reuters, afirma ter podido contar até 500 cadáveres, embora seja possível que na verdade a cifra seja mais alta.

Em Efe Baba Oyo, um mecânico, que foi ajudar no local do acidente, explicou que o fogo começou enquanto vários jovens recolhiam combustível que vazava de um conduto, aparentemente quebrado por eles mesmos para pegar o petróleo. Centenas de pessoas teriam se aproximado ao duto para pegar combustível, sendo atingidos imediatamente pela explosão, que deixou centenas de corpos carbonizados (HERCO, 2007).

## f) Blumenau

Na região do trevo da Dudalina (23/11/2008) ocorreu uma explosão de um gasoduto, um rompimento no gasoduto da empresa Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil (TBG), empresa subsidiária da Petrobras e responsável pelo trecho.

Uma das tubulações do Gasoduto Bolívia-Brasil que passa pela região foi rompida, o que causou o corte do fornecimento de gás para 60 indústrias e 77 postos de combustível catarinenses. Também foram afetados 99% dos usuários de gás natural do Rio Grande do Sul.

Segundo a TBG, a hipótese até o momento é que o rompimento foi causado por um acidente natural decorrente das chuvas. “Uma pedra de aproximadamente 15 toneladas rolou, juntamente com sedimentos e vegetação, por cima do duto, causando o rompimento naquele ponto” (Jornal Gazeta do Povo, 2009).

Quanto ao clarão visto pelos moradores, a TBG se limitou a informar que o rompimento da tubulação causou um incêndio localizado, formado pelo escapamento de gás seguido de uma ignição.

No entanto, esse acontecimento não é um incidente isolado, e se relaciona a uma série de acontecimentos similares que têm se registrado nos últimos tempos. Medidas para mitigar o risco.

A realização da APP (Análise Preliminar de Perigo) permite a identificação de eventos perigosos capazes de dar origem a acidentes na instalação analisada. Desta forma, apresenta-se a seguir a compilação de todas as medidas mitigadoras que deverão ser executadas para a redução dos riscos:

- a) Criar cursos abrangentes de treinamento na integração de todos os novos funcionários, e treinamento de integração para novos contratados e terceirizados.
- b) Registrar cursos de treinamento ministrados aos funcionários.
- c) Assegurar que o treinamento seja “baseado em competências” através do uso de um questionário ou testes básicos aplicados aos participantes no final.
- d) Estabelecer procedimentos formais de evacuação, pontos de encontro e chamadas de presença. Treinar todos os funcionários e realizar exercícios de

evacuação periódicos (preferivelmente a cada seis meses e no mínimo a cada ano). Avaliar o resultado dos exercícios e melhorar os procedimentos, se necessário.

e) Conscientizar todos os funcionários dos riscos de incêndio no local de trabalho e familiarizá-los com o uso de extintores, hidrantes e mangueiras de incêndio.

f) Assegurar que haja treinamento adequado para todos os funcionários visando à operação segura de máquinas e instalações, oferecendo instruções de Procedimentos Operacionais de Segurança no ambiente de trabalho. Familiarizar os funcionários com outras medidas de segurança como: o manuseio e armazenamento seguros de líquidos e gases inflamáveis, operação de empilhadeiras, etc. (HERCO, 2008).

A importância de prever estes riscos é garantir a segurança operacional. O gerenciamento de risco tem o propósito de prevenir ou minimizar a ocorrência de acidentes danosos à integridade das pessoas, do meio ambiente e das instalações, e é atualmente realizado, através de estudos que levam em conta um sistema de informações que inclui a técnica de avaliação de risco.

O objetivo do presente trabalho é mostrar a importância do gerenciamento de risco na atuação da ANP e fazer o levantamento do que é feito nela atualmente sobre esta questão. Dessa forma, a Análise de risco mostra-se importante para a concessão de autorizações por parte da ANP, uma vez que esta estará ciente dos possíveis acidentes nas unidades petrolíferas.

No próximo capítulo, serão apresentados os materiais e métodos utilizados no presente trabalho, destacando-se os principais modelos utilizados na análise de riscos de um vazamento de gás natural em um gasoduto.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

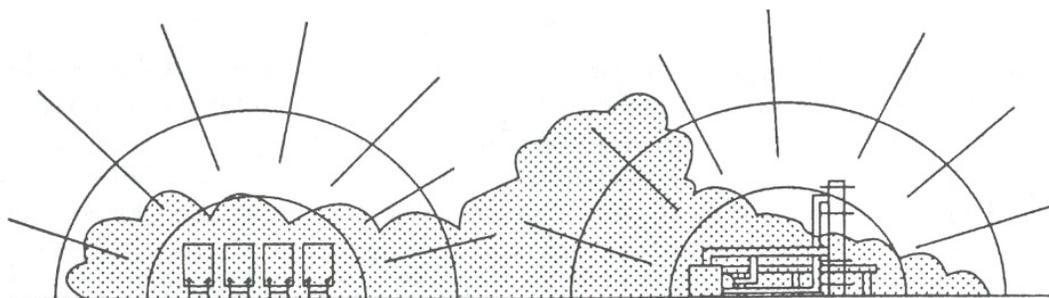
### 4.1 Modelagem

Neste estudo será apresentado o modelo Multi- Energia (TNO, 2005), o qual foi desenvolvido pelo *Prins Mauritz Laboratory (TNO)*, laboratório de referência internacional. Este modelo é um dos mais utilizados para avaliação da variação de uma onda de choque em análise de riscos. São correlações semi-empíricas sendo comentadas suas vantagens de aplicação e suas limitações.

#### 4.1.1. O método Multi-Energia

Um método de cálculo bastante empregado para avaliação da variação da onda de choque é o método Multi-Energia (VAN DEN BERG, 1985 e VAN DEN BERG *et al.*, 1987; VAN DEN BERG e VAN, 1991), desenvolvido pelo TNO. A idéia básica deste método consiste em que apenas as parcelas com certo grau mínimo de confinamento ou localizadas em partes da nuvem particularmente obstruídas são as que realmente contribuem para a geração de sobrepressão significativa, ao invés de toda a porção inflamável da nuvem.

A Figura 9 ilustra uma típica região congestionada que deve ser considerada para os cálculos de explosões.



**Figura 9:** Nuvem de vapor congestionada (CPR 14E, 1997; CPR 18E, 1999).

Esta consideração tende a caracterizar de forma mais realista o que acontece em cada região do local da explosão sem estabelecer um comportamento médio para todo o cenário, mas definir regiões onde uma média pode ser considerada representativa e cuja influência seja mais significativa sobre os efeitos finais da explosão. Sendo assim, é preciso fazer uma avaliação minuciosa do local da explosão para determinar quais seriam essas regiões.

O volume de cada uma destas regiões é calculado através de um somatório de volumes simples (paralelepípedos), que representam o volume total daquela região menos os volumes dos obstáculos (construções, reservatórios, tubulações, etc.) contidos no seu interior. Estas regiões, se localizadas a partir de uma certa distância mínima umas das outras, devem ter seus efeitos calculados de forma independente e posteriormente somados para se obter o efeito total. Para cada região, tem-se uma curva característica, como mostra a Figura 10, 11 e 12, que representa a intensidade da explosão. As curvas são numeradas de 1 a 10, onde a curva 1 é atribuída para regiões pouco obstruídas com grau de confinamento pequeno e a curva 10, para regiões congestionadas e confinadas. Neste estudo considerou-se a utilização da curva 8, visto a concentração de instalações próximo ao local da possível instalação do gasoduto.

O método Multi-Energia foi desenvolvido em base semi-empírica é voltado para estimativas de explosões de misturas de gás inflamável-ar em proporções estequiométricas a partir de normalizações da distância ou fator de escala  $R_s$ , definido pela equação 1:

$$R_s = \sqrt[3]{\frac{V \times E_v}{P_a}} \quad (1)$$

onde:

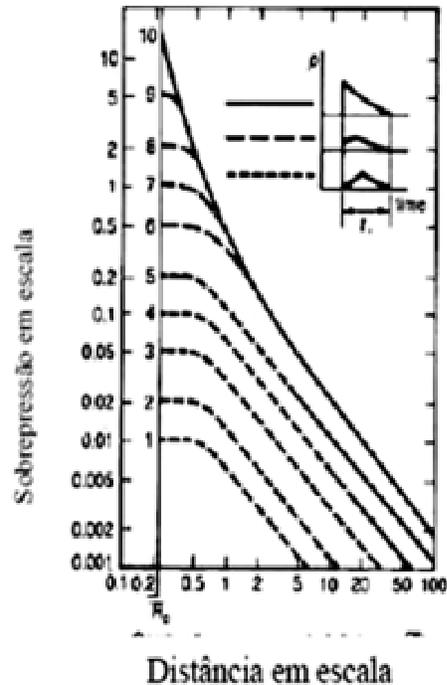
$V$  é o volume de mistura gás inflamável-ar, [m<sup>3</sup>];

$E_v$  é a energia liberada por metro cúbico de mistura estequiométrica hidrocarboneto-ar =  $3,5 \times 10^6$  J/m<sup>3</sup> (valor típico);

$P_a$  é pressão atmosférica, [N/m<sup>2</sup>];

As Figuras 10,11 e 12 apresentam as curvas características para o método Multi-Energia.

### Pico de Sobrepressão

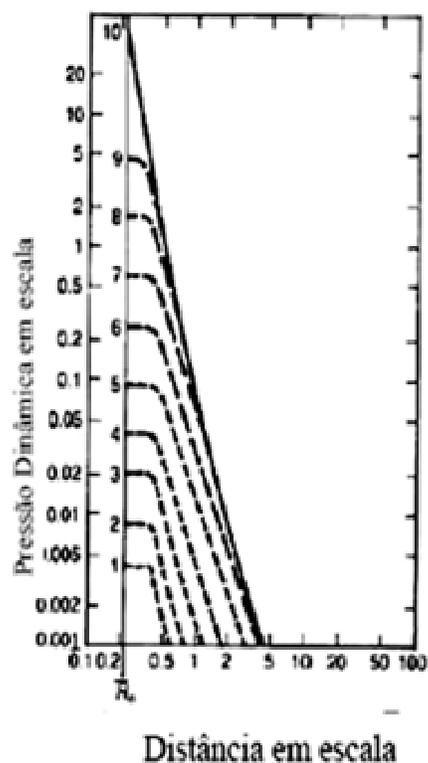


**Figura 10:** Curvas do método Multi-Energia - Sobrepressão (CPR 14E, 1997; CPR 18E, 1999).

Sabe-se que o pico de sobrepressão é basicamente o maior nível de sobrepressão sentido nesse ponto. O Tempo de duração é basicamente por quanto tempo o mesmo está lá; a combinação dos dois é o que realmente danifica uma estrutura.

Com o valor de  $R_s$  e a Figura 10, pode-se obter o pico de sobrepressão na onda de choque a qualquer distância do centro da explosão. Na Figura 10, o eixo das abscissas representa a distância real dividida pelo fator  $R_s$  e no eixo das ordenadas o pico de sobrepressão na onda de choque dividido pela pressão atmosférica. A intensidade da explosão, definida por um número inteiro de 1 a 10, tem por objetivo caracterizar combustões que vão desde um incêndio em nuvem (1) até uma detonação (10) devendo ser escolhida de forma cuidadosa em função de fatores como o grau de obstrução e confinamento da região a qual ela se aplica, assim como características da mistura inflamável, como a sua reatividade.

### Pico de sobrepressão dinâmica

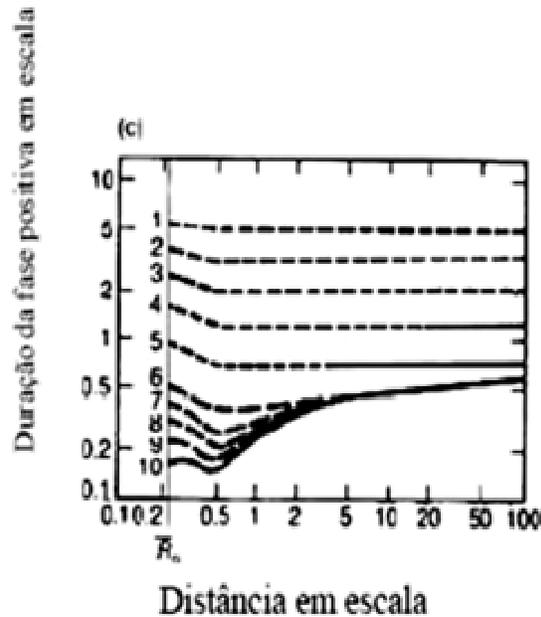


**Figura 11:** Curvas do método Multi-Energia – Pressão Dinâmica (CPR 14E, 1997; CPR 18E, 1999).

Além da pressão recém descrita, há ainda o vento associado à passagem da onda de choque que faz com que se tenha ainda uma chamada pressão dinâmica.. Os efeitos sobre a estrutura seriam resultados da adição de ambas as pressões. A pressão dinâmica representa uma contribuição relativamente menor e também foi estimada com base em experiências do TNO.

Por se tratar de um método que representa melhor os fatores que afetam a intensidade de uma explosão, como obstruções, confinamento e a influência do vento associado produzido pela onda de choque, o método Multi-Energia foi selecionado para este estudo, onde serão avaliados os efeitos de uma explosão de Gás Natural sobre pessoas e estruturas. Será utilizada neste trabalho a curva 8, para simulações em que se deseja representar explosões onde se tem a transição de uma deflagração a uma detonação. A aproximação das curvas apresentadas nas Figuras 10, 11 e 12 para o grau de confinamento 8 foi feito usando-se o *Software* MathCad (Versão 12).

### Tempo de duração da fase positiva



**Figura 12:** Curvas do método Multi-Energia – Duração da fase positiva (CPR 14E, 1997; CPR 18E, 1999).

Com a Figura 12, é possível obter a função  $tp(z)$  de duração da fase positiva, como função da distância em escala para o cálculo do tempo de exposição.

O tempo de duração da fase positiva é o tempo da passagem da onda de choque do ponto em estudo até o instante em que o valor da pressão atinja a pressão atmosférica.

#### 4.1.2. Modelo de vulnerabilidade de Eisenberg

Diversos efeitos resultantes de uma explosão de nuvem de gás têm sido estudados há muitos anos e podem ser classificados de duas formas: danos às pessoas e danos às estruturas. Os efeitos causados pela passagem de uma onda de choque podem ser estimados pelo modelo de vulnerabilidade de Eisenberg, método que faz uso das equações de Probit. Nesta seção, serão estudados como efeitos de uma explosão de gás: morte por hemorragia pulmonar, ruptura dos tímpanos e colapso de uma estrutura de alvenaria, sendo apresentadas as equações de Probit correspondentes ao tipo de dano e o pico de sobrepressão relativo à probabilidade de 1%, 50% e 99% de ocorrência do dano.

As equações de Probit (AIChE, 2000) representam uma relação entre a intensidade do efeito causador do dano e a variável de Probit (*Probability Unit*), onde esta está diretamente ligada à probabilidade de observação do dano. Na Tabela 6, encontram-se as equações de Probit coletadas da literatura para este estudo e, ao lado de cada uma, o respectivo dano no qual será usada.

**Tabela 6:** Equações de Probit com seus respectivos usos.

Equação de Probit, [Po] = N/m <sup>2</sup>	Efeitos
$y = -23,8 + 2,92 \ln(Po)$	Colapso de estruturas
$y = -77,1 + 6,91 \ln(Po)$	Morte por hemorragia pulmonar
$y = -12,6 + 1,524 \ln(Po)$	Ruptura dos tímpanos

Fontes: CCPS, 2000 e TNO, 1992.

Como se pode verificar na Tabela 6, cada tipo de dano possui uma equação com parâmetros diferentes; estes foram determinados através de observações feitas de acidentes ocorridos ao longo da história. Há na literatura uma grande variedade de equações de Probit, sendo que essas que foram apresentadas na Tabela 6 são normalmente utilizadas para estudos em que se deseja analisar a vulnerabilidade de explosões. Existem outras, na literatura, que relacionam probabilidades do dano por radiação térmica e toxidez quando há a ocorrência de incêndios, jatos de fogo, BLEVE e vazamentos de substâncias tóxicas.

Nas equações da Tabela 6, Po é o pico de sobrepressão na onda de choque em N/m<sup>2</sup> e y é a variável de Probit. A variável de Probit está diretamente relacionada com a probabilidade de ocorrência dos danos através da relação dada pela equação 2.

$$\text{Prob} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (2)$$

Onde:

Prob é a probabilidade de ocorrência do dano e u é a variável de integração.

Esta relação entre  $y$  e Prob é mais facilmente obtida com o uso da Tabela 6. Assim, sabendo-se as características da explosão, determina-se o pico de sobrepressão da onda de choque na distância onde se encontra a estrutura ou a pessoa. Com o nível de sobrepressão, encontra-se o valor da variável de Probit e com ela a probabilidade de ocorrência dos danos. Todos estes modelos de efeitos apresentados neste capítulo foram implementados com uso do *Software MathCad* (Versão 12).

A relação entre a probabilidade de morte e o Probit correspondente segue uma curva do tipo sigmóide. A Tabela 7 apresenta o valor de Probit em função da probabilidade de morte, em valores percentuais.

**Tabela 7:** Relação entre a variável de Probit e a probabilidade.

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	--	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
%	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Fonte: CCPS, 1994.

Para a definição dos valores de Sobrepressão de 1%, 50% e 99% de letalidade, foi utilizada a equação de Probit, dada por Eisenberg (AIChE, 2000).

Com base em Lees (1996), a Tabela 8 apresenta uma relação entre os valores de sobrepressão e os prejuízos e danos possíveis de ocorrer às instalações e pessoas.

**Tabela 8:** Prejuízos e danos possíveis de ocorrer às instalações e pessoas devido a efeitos de sobrepressão.

<b>Sobrepessão (bar)</b>	<b>Dano Esperado</b>
0,001	Estrondo alto (137 dB de frequência baixa, 10-15 Hz).
0,002	Quebra ocasional de janelas grandes, que já estão sob tensão.
0,0027	Estrondo muito alto (143 dB). Trinca dos vidros abaulados sônicos.
0,006	Quebra de janelas pequenas sob tensão.
0,01	Pressão típica para trinca nos vidros.
0,02	Alguns danos nos tetos das casas. Quebra de 10% dos vidros das janelas. “Distância Segura” (probabilidade de 95% de não ter dano sério além desta área). Limite de estilhaços.
0,027	Limite inferior de dano estrutural.
0,03 – 0,06	As janelas normalmente são destruídas, e algumas dessas tem a armação danificada.
0,04	Pequenos danos nas estruturas de casas.
0,06	Danos parciais de casas, as quais ficarão inabitáveis.
0,06 – 0,13	Destruição de asbesto corrugado. Falhas nas amarras das chapas de aço ou painéis de alumínio, seguido de deformação. Destruição da amarração dos painéis (tábuas) de madeira das casas comuns.
0,06 – 0,5	Faixa onde os estilhaços podem causar ferimentos leves ou graves na pele.
0,09	Leve distorção da armação de aço dos edifícios fechados.
0,13	Colapso parcial das paredes e telhados das casas.
0,13 – 0,2	Destruição das paredes de concreto ou de blocos não-reforçadas.
0,15	Limite inferior de sérios danos na estrutura.
0,16 – 0,84	Faixa de 1 a 90% de ruptura dos tímpanos das populações expostas.
0,17	Destruição de 50% das casas de alvenaria.
0,20	Distorções das construções com armação de aço, que são movidas do fundamento. Pequenos danos em máquinas pesadas (1.400 kg), nos edifícios industriais.

**Tabela 8:** Prejuízos e danos possíveis de ocorrer às instalações e pessoas devido a efeitos de sobrepressão (continuação).

<b>Sobrepressão (bar)</b>	<b>Dano Esperado</b>
0,20 – 0,27	Destruição das construções de painéis de aço sem armação. Ruptura de tanques de armazenagem de óleo.
0,27	Ruptura de construções industriais “leves” cobertas.
0,34	Destruição de áreas arborizadas. Leves danos em grandes prensas hidráulica (18.200 kg), no interior das construções.
0,34 – 0,48	Destruição quase total das casas.
0,48	Tombamento dos vagões de trens carregados.
0,48 – 0,55	Trinca nos tijolos não reforçados de 20-30 cm de espessura, por tensão de cisalhamento.
0,62	Demolição de vagões fechados de trem.
0,68	Provável destruição total de construções. Partes pesadas de máquinas (3.200 kg) se movem, e ficam muito danificadas. Partes muito pesadas de máquina (5.500 kg) resistem.
1,05 – 2,0	Faixa de 1 a 99% de fatalidades das populações expostas, devido ao efeito direto da explosão.
20,7	Limite de borda da cratera.

No caso de incêndios, segundo o TNO (2004), a vulnerabilidade das conseqüências originadas por esses fenômenos são determinadas pela aplicação de metodologias do tipo Probit, resultando na estimativa da probabilidade de ocorrência de um determinado dano, ou percentual de pessoas afetadas, em função das doses de radiação recebidas e dos tempos de exposição.

A Tabela 9 apresenta diferentes probabilidades de fatalidade e os efeitos observados para vários níveis de radiação.

**Tabela 9:** Efeitos de Radiação Térmica.

<b>Radiação Térmica (kW/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Efeito Observado</b>
1	Sol ao meio-dia.
1,6	Não causa efeito por longa exposição.
1,75	Limite de dor alcançado após 60 s.
2	Danos aos cabos com isolamento em PVC.
4	Limite de dor alcançado após 20 s.
5	Limite de dor alcançado após 15 s.
6,4	Limite de dor alcançado após 8 s. Queimaduras de 2º grau após 20 s.
12,5	Fusão de tubulações plásticas. Ignição de roupas. Ignição “pilotada” da madeira. Queimaduras de 1º grau após 10 s.
16	Queimaduras graves após 5 s.
25	Ignição espontânea da madeira. Perigo à vida.
37,5	Danos aos equipamentos industriais. Perigo à vida.

#### 4.1.2.1 *Picos de sobrepressão para 1% de probabilidade do efeito*

A partir do modelo de Eisenberg, pode-se determinar os picos de sobrepressão que correspondem à probabilidade de ocorrência de cada efeito. O pico de sobrepressão ( $P_o$ ) é determinado a partir das equações apresentadas da Tabela 6 usando como variável de Probit o valor 2,67 retirado da Tabela 7 correspondente à probabilidade de 1%.

#### 4.1.2.2 *Picos de sobrepressão para 50% de probabilidade do efeito*

A partir do modelo de Eisenberg, pode-se determinar os picos de sobrepressão que correspondem à probabilidade de ocorrência de cada efeito. O pico de sobrepressão ( $P_o$ ) é determinado a partir das equações apresentadas da

Tabela 6 usando como variável de Probit o valor 5,0, retirado da Tabela 7 correspondente a probabilidade de 50%.

#### 4.1.2.3 *Picos de sobrepressão para 99% de probabilidade do efeito*

Da mesma maneira como foi realizada nas seções 4.1.2.1 e 4.1.2.2, usa-se como variável de Probit o valor 7,33, para probabilidade de 99%.

#### 4.1.3. Metodologia para o uso dos modelos

Os modelos apresentados (Multi-Energia e Eisenberg), neste trabalho, serão usados na seguinte forma:

1. Será considerada uma certa região da área de processo de uma planta petroquímica com um grau de congestionamento capaz de possibilitar a queima explosiva de uma nuvem de vapor inflamável;

2. Uma vez estabelecido o volume total da área (região) que será preenchida com Gás Natural, fazendo-se o uso das equações da curva do método Multi-Energia, implementadas no *Software* MathCad 12, obtém-se o nível de sobrepressão da onda de choque acrescido da sobrepressão dinâmica devido aos ventos associados à passagem da onda de choque como função da distância ao centro da explosão;

3. Resolvem-se as equações específicas do método utilizando dados obtidos da Tabela 7 para determinar a distância onde ocorrem os picos de sobrepressão que correspondem a se terem as probabilidades de 1%, 50% e 99% de colapso de estruturas, prédios, por exemplo, morte por hemorragia pulmonar e ruptura de tímpanos.

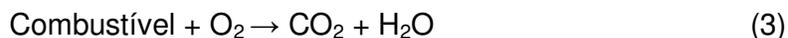
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em plantas petroquímicas, os hidrocarbonetos podem ser encontrados em tanques de armazenamento, vasos de pressão, de processo, torres, etc. Caso ocorra um acidente em que se tenha mais o controle da contenção, por exemplo, a ruptura de uma válvula, haveria uma grande quantidade de material liberado com a formação de uma nuvem de gás-inflamável.

Uma das possíveis conseqüências de interesse neste cenário seria uma explosão desta nuvem de vapor liberado após a mistura com ar formando uma nuvem de hidrocarboneto-ar no interior da área de processo onde, em geral, as condições existentes favorecem o acontecimento de queima explosiva devido à presença de elementos geradores de turbulência. Estas áreas, normalmente, são bastante congestionadas pela presença de obstruções, tais como equipamentos, tubulações, suportes, etc., fatores que favorecem a geração de turbulência e o aumento da velocidade de queima com potencial de a mesma se tornar explosiva com geração de onda de choque.

O conhecimento do volume de gás inflamável presente na região é necessário para a execução dos cálculos de avaliação do pico de sobrepressão da onda de choque. O volume ocupado pelos equipamentos deverá ser estimado, fazendo com que o volume livre que poderia ser ocupado pela mistura seja a diferença entre eles. Para a realização deste estudo volumes de mistura ar-vapor inflamável foram escolhidos de modo a representar os cenários de acidente típicos de situações concretas.

Considerando-se que no método Multi-Energia a mistura é estequiométrica, pode-se estimar a quantidade de hidrocarboneto necessária para ocupar o volume livre da área de processo em proporção estequiométrica com o ar. A reação do metano com ar em proporções estequiométricas são representadas pelas equações 3 e 4.



O fluxograma da seqüência de cálculos dos alcances das distâncias seguras está apresentado na Figura 13.

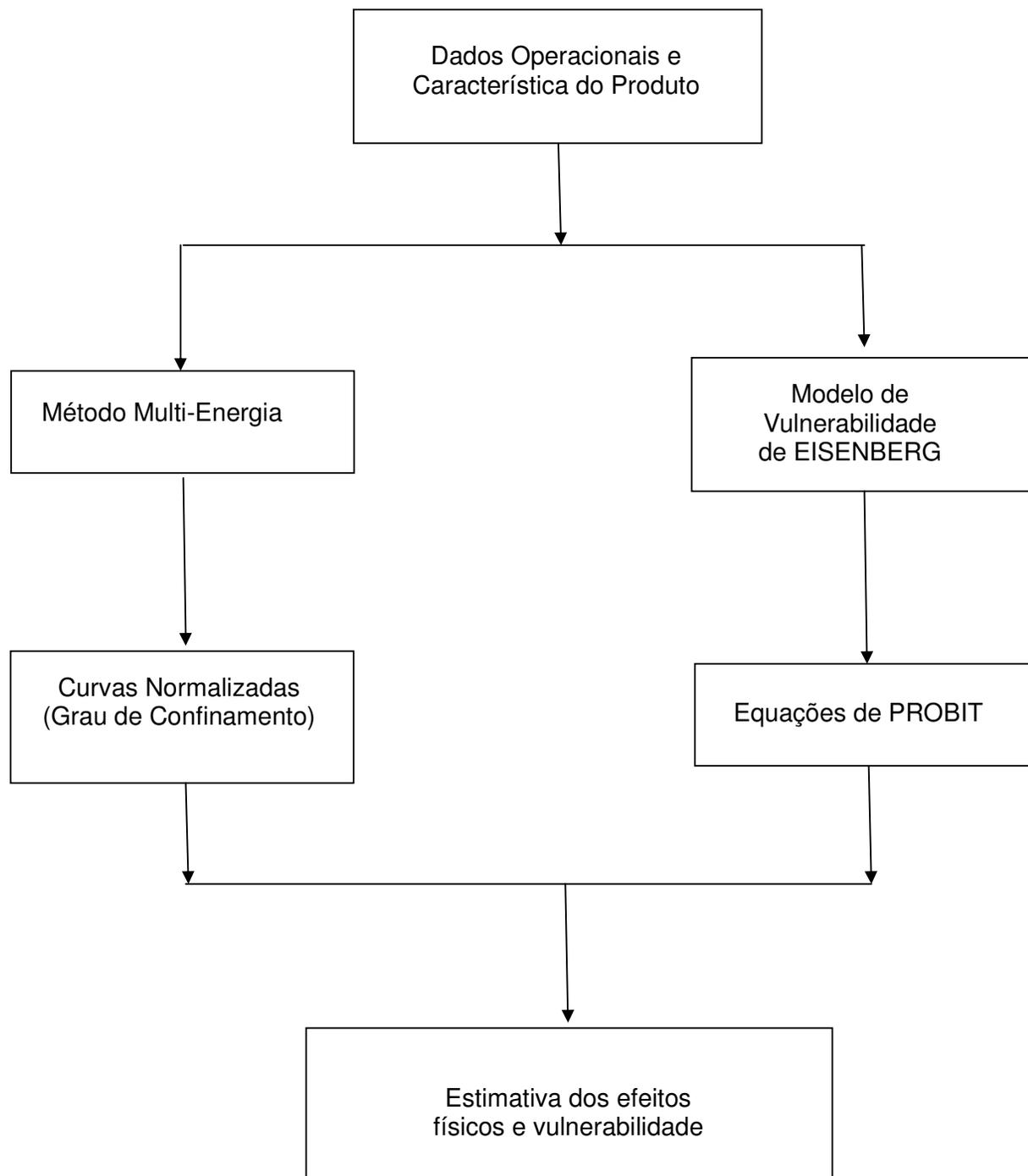
Na temperatura de 25 °C, considerada como sendo a temperatura média do ar na região onde se localizará o gasoduto, tem-se conhecido o volume de 30.000m<sup>3</sup> e os valores de taxa de descarga de 844,87kg de metano. Analisando-se estes valores de mistura estequiométrica do metano com ar, pode-se perceber que não são necessárias grandes quantidades de substância inflamável para, em condições favoráveis de grau de confinamento e de turbulência, que se tenha a ocorrência de explosão de nuvem.

Pesquisas experimentais durante as últimas décadas mostraram claramente que a combustão deflagrada gera uma explosão somente naquelas partes da nuvem de vapor inerte que são suficientes obstruídas e parcialmente confinadas (ZEEUWEN *et al.*, 1983; HARRISON e EYRE, 1987 e VAN WINGERDEN, 1989). É concluído que um ambiente parcialmente confinado e/ou obstruído oferece condições apropriadas para a combustão explosiva deflagrada (TWEEDDLE, 1989).

As simulações foram realizadas na empresa Herco Consultoria de Riscos, localizada na cidade de Blumenau-SC, Brasil.

Neste estudo são apresentados os resultados de distância ao centro de uma explosão determinada para as probabilidades de 1%, 50% e 99% de ocorrência dos danos referentes a colapso de estruturas, morte por hemorragia pulmonar e ruptura de tímpanos, a partir do volume de 30.000m<sup>3</sup> ocupados por uma mistura de ar-metano, com o uso do método Multi-Energia.

O fluxograma da seqüência de cálculos dos alcances das distâncias seguras esta apresentado na Figura 13.



**Figura 13:** Fluxograma da seqüência de cálculos.

## 5.1 Típico Cenário de Acidente

### 5.1.1 Tipologias acidentais

#### 5.1.1.1 *BLEVE (Bola de Fogo)*

BLEVE é a abreviação de “Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion”, ou seja, Explosão de Vapor em Expansão de um Líquido em Ebulição. Este fenômeno ocorre da seguinte forma: um recipiente contendo um líquido tem o seu rompimento catastrófico, ou seja, o recipiente desprende instantaneamente todo o líquido armazenado. O líquido entra em ebulição imediatamente por ser um produto liquefeito, ou por estar sendo aquecido à elevada temperatura, devido a um incêndio por exemplo. O líquido então, vaporiza no ar a uma certa altitude, criando uma grande esfera deste vapor. Se o líquido for inflamável (o que ocorre na maioria das vezes, devido a incêndios), esta esfera vem a queimar-se instantaneamente. Os danos causados devido à sobrepressão da explosão, além dos fragmentos do recipiente, são de grande extensão. Os níveis de radiação térmica deste evento também são extremamente elevados, e a chama causada pela ignição é chamada de “Bola de Fogo”.

Para as liberações de produtos inflamáveis na forma gasosa, caso a liberação ocorra em um curto espaço de tempo com ignição imediata, é possível ocorrer a formação de Bola de Fogo. Ocorre com significativa magnitude em vazamentos de grandes inventários, sob alta pressão (STREHLOW *et al.*, 1979).

#### 5.1.1.2 *Flash Fire*

Caracteriza-se pela ignição imediata de uma atmosfera inflamável oriunda do vazamento do produto. Este tipo de consequência é normalmente fatal, visto que por definição há um contato direto da chama com a vítima, e também há elevado grau de radiação térmica. Já as consequências para as instalações são reduzidas. O exemplo clássico de um *Flash Fire* seria a ignição de uma churrasqueira, após o encharcamento do carvão com álcool. Logo que espalhado, o álcool começa a evaporar-se formando uma nuvem inflamável. Com a presença de uma fonte de ignição (fósforo), a nuvem irá queimar-se total e instantaneamente, provocando a

forte radiação térmica e a presença da chama em todo o seu volume. O *Flash Fire* é caracterizado pelo Limite Inferior de Inflamabilidade (L.E.L.).

Uma definição clássica de *Flash Fire*, obtém-se do manual do TNO (1999).

“Um *flash fire* resulta da ignição de uma nuvem inflamável onde essencialmente não há aumento da taxa de combustão. Na verdade, a taxa de combustão num *flash fire* aumenta levemente comparada à fase laminar. Este aumento é principalmente devido às influências secundárias do vento e da rugosidade de superfície.”

“(…) Somente a taxa de combustão diferencia o *flash fire* de uma explosão em nuvem. A taxa de combustão determina se o efeito de explosão estará presente (como em explosão em nuvens) ou não (com em *flash fires*).”

“Os principais perigos de um *flash fire* são a radiação e o contato direto com a chama. O tamanho da nuvem inflamável determina a área possível de contato direto com a chama.” (AIChE, 1994)

Para a determinação da nuvem inflamável correspondente ao *Flash Fire*, será utilizado o limite inferior de explosão do produto liberado.

#### 5.1.1.3 Explosão

Através de um estudo de caso, onde se considera, pelo modelo Multi-Energia, confinamento igual a 8 e conservativamente 80% da nuvem de volume confinado, observa-se que alguns dos resultados obtidos para explosão foram negligenciáveis. Isso ocorre devido às características físico-químicas do produto, pois o Gás Natural (produto utilizado neste estudo) possui densidade menor do que o ar, facilitando sua dispersão no meio ambiente em caso de vazamento. Com esta análise foi possível concluir que alguns cenários de explosão não são relevantes ao estudo.

Para este estudo, foi analisada a dispersão do vazamento para a tipologia de explosão.

### 5.1.2 Identificação do perigo

Como resultado da análise de risco do gasoduto, as atividades são classificadas em três níveis de risco: alto, médio e baixo.

Enquadram-se em atividades de alto risco todas aquelas executadas nos locais em que a AQR (Análise Qualitativa de Riscos) apresenta risco alto e muito alto.

Atividades de alto risco necessitam dos seguintes itens de segurança:

**1.** Padrão operacional específico indicando os riscos das atividades e as medidas preventivas;

**2.** Treinamento específico de conhecimento de risco para o pessoal que planeja e executa estas atividades de forma a serem considerados autorizados para a execução destas atividades;

**3.** Autorização formal e específica para a execução de cada serviço;

**4.** Ordem de serviço específica.

Enquadra-se em atividades de baixo risco, as atividades em que a AQR (Análise Qualitativa de Riscos) resultou em baixo risco e muito baixo e que a ARA (Atividades de Alto Risco) resultou em baixo risco.

Estas atividades não necessitam de itens específicos de segurança; a elaboração de procedimentos fica a critério das áreas, de acordo com a complexidade e a importância da atividade para a qualidade total e sistema de gestão da qualidade (TARALLI *et al.*, 1996).

Estas avaliações são elaboradas sempre ao início de alguma atividade de operação e manutenção desde que seja especificada sua necessidade nos padrões operacionais ou ordens de serviço, bem como as atividades em que as Normas Regulamentadoras (NR) do Ministério do Trabalho exigem a execução de avaliação.

As operações de risco específico definidas pelas NR's somente podem ser executadas após a liberação formal por parte do responsável da área mediante a aprovação de avaliação de risco da atividade pelo mesmo a cada execução (HERCO, 2008).

Caso ocorra alguma alteração nas instalações, deve-se executar uma nova AQR (Análise Qualitativa de Riscos) das unidades.

Neste estudo foi dada ênfase somente à atividade de nível alto em caso de explosão. Estudou-se um possível cenário de rompimento total (ruptura catastrófica) da tubulação de um determinado gasoduto, responsável pela transferência de Gás Natural supostamente a ser localizado próximo às instalações do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina).

A Tabela 10 apresenta as categorias de frequência.

Na Tabela 11 estão apresentadas as categorias de gravidade utilizadas para a realização da APP (Análise Preliminar de Perigo).

A Tabela 12 apresenta a Matriz de Riscos, resultante da combinação das categorias de Frequência e de Gravidade.

**Tabela 10:** Categorias de frequência.

<b>CATEGORIAS DE FREQUÊNCIA</b>		
<b>Categoria</b>	<b>Descrição</b>	<b>Probabilidade</b>
<b>A (Provável)</b>	Há a probabilidade de ocorrer mais de uma vez durante a vida útil da instalação.	$P > 10^{-1}$
<b>B (Razoavelmente Provável)</b>	Há a probabilidade de ocorrer pelo menos uma vez durante a vida útil da instalação.	$10^{-2} \leq P < 10^{-1}$
<b>C (Remota)</b>	Pouco provável de ocorrer durante a vida útil da instalação.	$10^{-3} \leq P < 10^{-2}$
<b>D (Extremamente Remota)</b>	Teoricamente possível, porém não esperado de ocorrer durante a vida útil da instalação.	$P < 10^{-3}$

**Tabela 11:** Categorias de gravidade.

CATEGORIAS DE GRAVIDADE	
Categoria	Descrição
<b>I (Desprezível)</b>	Nenhum dano ou dano não mensurável.
<b>II (Marginal)</b>	Danos irrelevantes ao meio ambiente e às pessoas.
<b>III (Crítica)</b>	Possíveis danos ao meio ambiente devido às liberações de substâncias químicas, tóxicas, ou inflamáveis. Pode provocar lesões de gravidade moderada às pessoas ou impactos ambientais com tempo reduzido de recuperação.
<b>IV (Catastrófica)</b>	Impactos devido à liberação de substâncias químicas, tóxicas, ou inflamáveis. Pode provocar mortes ou lesões graves às pessoas ou impactos ambientais com tempo de recuperação elevado.

**Tabela 12:** Matriz de riscos resultante da combinação das categorias de frequência e de gravidade.

Gravidade Frequência	I (Desprezível)	II (Marginal)	III (Crítica)	IV (Catastrófica)
<b>A (Provável)</b>	RM	RA	RMA	RMA
<b>B (Razoavelmente Provável)</b>	RB	RM	RA	RMA
<b>C (Remota)</b>	RMB	RB	RM	RA
<b>D (Extremamente Remota)</b>	RMB	RMB	RB	RM

Fonte: HERCO, 2008.

Legenda:

<b>RMA</b>	Risco Muito Alto
<b>RA</b>	Risco Alto
<b>RM</b>	Risco Médio
<b>RB</b>	Risco Baixo
<b>RMB</b>	Risco Muito Baixo

A medida do risco é dada pela perda ocorrida num determinado intervalo de tempo. Para qualquer perigo, o risco pode sempre ser reduzido através de um aumento significativo das salvaguardas. O risco decorrente de um perigo somente pode ser totalmente eliminado pela supressão da fonte de risco.

A Figura 14 apresenta a APP, com os levantamentos dos riscos que podem ocorrer com a instalação, causas, modo de detecção do vazamento, frequência de ocorrer o risco, gravidade do risco, classificação do risco e recomendações para minimizar, controlar ou reduzir o risco em caso de um vazamento de Gás Natural.



## APP – ANÁLISE PRELIMINAR DE PERIGOS

Gasoduto	Subsistema: Linha - Km 10					Data:
Causas	Modos de Detecção	Efeitos	Freq.	Grav.	Classif.	Recomendações
Grande Vazamento na tubulação ou válvula por: <ul style="list-style-type: none"> <li>- falha mecânica de linha ou de componentes associados;</li> <li>- falhas em soldas;</li> <li>- impacto mecânico;</li> <li>- falha humana quando da realização da manutenção / inspeção em equipamentos;</li> <li>- vazamento no filtro.</li> </ul> Obs.: Válvulas esfera manual 10"	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Percepção de Ruído;</li> <li>- Via Sala de Controle;</li> <li>- Odor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Liberação de produto inflamável com possibilidade de incêndio e explosão.</li> </ul>	C	IV	RA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar o Programa de Gerenciamento de Riscos para instalações a serem construídas;</li> <li>- Implementar Plano de Emergência Local;</li> <li>- Avaliar a possibilidade e implementar na estação sistema que de temperatura elevada da instalação, para isolamento e proteção do Gasoduto.</li> </ul>
Pequeno Vazamento na tubulação ou válvula por: <ul style="list-style-type: none"> <li>- corrosão;</li> <li>- vazamento no filtro.</li> </ul> Obs.: Válvulas esfera manual 10"	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visual;</li> <li>- Sonoro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Liberação de produto inflamável.</li> </ul>	A	II	RA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementar o Programa de Gerenciamento de Riscos para instalações a serem construídas;</li> <li>- Implementar Plano de Emergência Local.</li> </ul>

**Figura 14:** Análise preliminar de perigos apresentada nesse estudo.

Com a classificação do risco (coluna 7 da Figura 14), elabora-se a matriz de risco, com os riscos identificados na APP. A Tabela 13 apresenta a distribuição das hipóteses acidentais na matriz de risco estudada.

**Tabela 13:** Distribuição das hipóteses acidentais na matriz de risco estudada.

<b>Gravidade Frequência</b>	<b>I (Desprezível)</b>	<b>II (Marginal)</b>	<b>III (Crítica)</b>	<b>IV (Catastrófica)</b>
<b>A (Provável)</b>		2		
<b>B (Razoavelmente Provável)</b>				
<b>C (Remota)</b>				1
<b>D (Extremamente Remota)</b>				

## 5.2 Seleção das Hipóteses Acidentais

A Tabela 14 apresenta o resumo da listagem das diversas hipóteses acidentais com grau de gravidade III ou IV, e que terão continuidade neste estudo, de forma que se possa obter a quantificação do risco.

Depois de identificadas as hipóteses acidentais na APP (Análise Preliminar de Perigos) (Figura 14), calculam-se os resultados obtidos nas simulações das conseqüências (efeitos físicos) e análise de vulnerabilidade para o gasoduto.

Em cada um desses cenários gerados, existem conseqüências danosas ao ser humano, como por exemplo, radiação térmica gerada por um incêndio e/ou a sobrepressão provocada por uma explosão.

A Tabela 15 apresenta os dados de entrada do cenário a ser avaliado.

**Tabela 14:** Seleção das hipóteses acidentais.

SUBSISTEMA	HIPÓTESE	DESCRIÇÃO
Gasoduto 10"	1	Grande Vazamento de Gás Natural através do gasoduto 10", devido a perdas por falha na solda

**Tabela 15:** Dados do cenário avaliado na APP.

DADOS DE ENTRADA PARA MODELAGEM E SIMULAÇÕES						
Hipótese	Descrição	Produto	Diâmetro (mm)	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Temp. (°C)	Direção Vazamento
<b>Gasoduto</b>						
1	Grande Vazamento na linha 10"	Gás Natural	254	100	55	Vertical

Com o levantamento do cenário identificado e os dados operacionais, calculam-se os efeitos de explosão causados às estruturas e pessoas através de modelagens matemáticas (uso do *Software* Mathcad 12 para resolução das equações específicas). Utilizou-se os modelos coletados das publicações do TNO (2005) (Multi-Energia) e do AIChE (1994) (Eisenberg).

### 5.2.1 Dados adicionais (Taxa de descarga do Gás Natural)

É importante saber qual é a taxa de descarga (vazamento) do Gás Natural que provocou a explosão estudada neste trabalho.

Os modelos de taxa de descarga são baseados em um balanço de energia mecânica representado pela equação 5.

$$\int_{p_2}^{p_1} \frac{1}{\rho} dp + g_x(z_2 - z_1) + \frac{1}{2} [(v_2)^2 - (v_1)^2] + \sum e_f + \frac{w_s}{m} = 0 \quad (5)$$

A liberação de gás pode ocorrer de várias origens: desde um furo perto de um tanque, de uma tubulação longa, ou de válvulas de alívio ou *vents*. Diferentes procedimentos de cálculos são aplicados para cada tipo liberação. Para a descarga de gases, enquanto a pressão decai pela liberação, o gás expande. Aliás, a pressão integral no balanço de energia mecânica, equação 5, requer uma equação de estado e uma termodinâmica para especificação do trajeto para completar a integração. Para liberações de gás através de dutos, a equação 5 é integrada ao longo do trajeto azeotrópico para determinar a taxa de descarga. Esta equação assume gás ideal.

A taxa de descarga é calculada por meio da equação 6:

$$m = C_d \times A \times \rho \times \sqrt{2(\Delta H)} \quad (6)$$

onde:

$$C_d = 0,87 \text{ (adimensional)}$$

$$A = 0,254 \text{ m}^2$$

$$\rho = 0,82 \text{ kg/m}^3$$

A variação de entalpia é calculada pela equação 7 ou 8:

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_p \times dT + P_1 \times V \quad (7)$$

$$\int_{T_1}^{T_2} C_p \times dT = \left[ \int_{298,15}^{81,49} (3,381 + 18,044 \times 10^{-3} \times T - 4,3 \times 10^{-6} \times T^2) dT \right] \quad (8)$$

onde:

$$\int_{T_1}^{T_2} C_p \times dT = -1,9869 \times 10^3 \text{ cal/mol} \quad \text{ou} \quad \int_{T_1}^{T_2} C_p \times dT = -196,516 \text{ KJ/kg}$$

$$\Delta H = -196,516(\text{KxJ})/\text{kg} + 10000000 \times \text{N/m}^2 \times 1,0870 \times \text{m}^3/\text{kg}$$

$$\Delta H = -1,087 \times 10^7 \text{ xKJ/kg}$$

Substituindo as equações 6 e 8, a taxa de descarga é dada pela equação 9:

$$m = 0,87 \times 0,254 \text{ m} \times 0,82 \text{ kg/m}^3 \times \sqrt{-2[(-1,087 \times 10^7) \text{ KJ/kg}]} \quad (9)$$

$$m = 844,87 \text{ kg/s}$$

### 5.2.2 Aplicação do método Multi-Energia do TNO (2005)

A seguir, encontra-se o volume estimado de uma área de processo que será preenchido com Gás Natural para se ter uma mistura estequiométrica gás inflamável-ar, considerando-se que o ar contém 20% em volume de oxigênio.

$$V = 30.000 \text{ m}^3$$

onde:

V é o volume estimado de uma área de processo que seria preenchido com metano em  $\text{m}^3$ .

Com o volume conhecido da mistura gás inflamável-ar, pode-se estabelecer os picos de sobrepressão e o tempo de duração da fase positiva (Figura 8) como uma função da distância do centro da explosão, utilizando as curvas de  $P_s$  versus  $X_s$  (razão entre distância real (z) com o fator de escala  $R_s$ ) (TNO, 2005; TNO, 2004; TNO, 1999).

No método Multi-Energia têm-se 10 curvas  $P_s \times X_s$  (Figuras 10, 11 e 12) à disposição; cada uma representando um tipo de classe de obstáculos. Considerando o vazamento nas proximidades do Departamento de Engenharia Química e

Engenharia de Alimentos, utilizou-se a curva 8 devido à quantidade de instalações nas proximidades. Segundo o AIChE (2000), a escolha da curva se dá pelo nível de confinamento da região escolhida onde a curva 1 seria equivalente a um campo aberto e a curva 10 seria equivalente a um local muito confinado, ou seja, com muitas construções (obstáculos).

Nos itens A, B e C, foi realizada uma aproximação da curva 8 da Figura 10, 11 e 12 para o pico de sobrepressão, pico de sobrepressão dinâmica e para o tempo de duração da fase positiva, todas retiradas do "Yellow Book" (TNO, 2005).

$$R_s = \left( \frac{V \times 3,5 \times 10^6}{P_{atm}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

$$R_s = \left( \frac{(30000) \times 3,5 \times 10^6}{1,0132 \times 10^5} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

sendo:

$R_s$  o fator de escala usado no método Multi-Energia ( $R_s=101,1963m$ ).

$$X_s = \frac{z}{R_s} \quad (12)$$

onde:

$X_s$  é a razão entre a distância real e o fator de escala  $R_s$ .

#### 5.2.2.1 Aproximações da curva do grau de confinamento 8

Nos itens A, B e C a seguir, estão descritas as aproximações da curva 8 apresentada nas Figuras 10,11 e 12 para o pico de sobrepressão, pico de

sobrepressão dinâmica e para o tempo de duração da fase positiva, todas retiradas do "Yellow Book" (TNO, 2005).

**A - Curvas para picos de sobrepressão (Ps).**

$$Ps8(x) = \begin{cases} 2 & \text{if } (x > 0,1) \wedge (x < 0,4) \\ 10^{-0,022-0,565 \cdot \log(x)+0,622 \cdot \log(x)^2} & \text{if } x > 0,4 \wedge x < 0,58 \\ 10^{-0,299-1,53 \cdot \log(x)+0,03 \cdot \log(x)^2} & \text{if } x > 0,58 \wedge x < 3 \\ 10^{-0,423-1,257 \cdot \log(x)} & \text{if } x > 3 \wedge x < 5 \\ 10^{-0,523-1,114 \cdot \log(x)} & \text{if } x > 5 \end{cases} \quad (13)$$

**B - Curvas para picos de sobrepressão dinâmica (Psd).**

$$Psd8(x) = \begin{cases} 1,6 & \text{if } (x > 0,1) \wedge (x < 0,3) \\ 10^{-1,259-4,52 \cdot \log(x)+3,196 \cdot \log(x)^2} & \text{if } x > 0,3 \wedge x < 0,55 \\ 10^{-1,144-3,08 \cdot \log(x)+1,384 \cdot \log(x)^2} & \text{if } x > 0,55 \wedge x < 0,9 \\ 10^{-1,152-3,28 \cdot \log(x)+0,852 \cdot \log(x)^2} & \text{if } x > 0,9 \wedge x < 3 \\ 10^{-1,408-2,337 \cdot \log(x)} & \text{if } x > 3 \end{cases} \quad (14)$$

**C - Curvas para o tempo de duração da fase positiva (tp).**

$$tp8(x) = \begin{cases} 10^{-0,783-0,39 \cdot \log(x)} & \text{if } x > 0,215 \wedge x < 0,55 \\ 10^{(-0,56+0,408 \cdot \log(x))-0,235 \cdot \log(x)^2} & \text{if } x > 0,55 \wedge x < 4,15 \\ 10^{-0,507+0,194 \cdot \log(x)-0,027 \cdot \log(x)^2} & \text{if } x > 4,15 \end{cases} \quad (15)$$

Onde x é uma variável estimada em função das curvas do modelo Multi-Energia.

*5.2.2.2 Utilização de curvas características para o cálculo do pico de sobrepressão.*

A seguir estão apresentadas as expressões que representam o cálculo do pico de sobrepressão com o uso da curva 8 ajustada, apresentada no item 5.2.2.1.

$$\text{Picopress8}(z) = \text{Patm} \times \left( \text{Ps8} \left( \frac{z}{R_s} \right) + \text{Psd8} \left( \frac{z}{R_s} \right) \right) \quad (16)$$

Para a determinação do tempo que a onda de choque possui valores de sobrepressão acima da pressão atmosférica, é necessário calcular a velocidade do som no ar e multiplicar pela função  $tp(z)$  de duração da fase positiva adimensional, como função da distância em escala. O cálculo da velocidade do som é dado pelas equações 17 e 18.

$$V_s = \sqrt{\frac{\gamma \times R \times T_{amb}}{M \times a_r}} \quad (17)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{1,4 \times 8314 \times 298,15}{28,9}} \quad (18)$$

Logo, a velocidade do som ( $V_s$ ) igual a 346,5273 m/s.

O tempo que a onda de choque possui valores de sobrepressão acima da pressão atmosférica é calculado pela equação 19.

$$\text{Temp8}(z) = \frac{R_s}{V_s} \times tp8 \left( \frac{z}{R_s} \right) \quad (19)$$

### 5.2.3 Estudo dos efeitos de explosões

Nesta etapa, serão calculados os picos de sobrepressão necessários para que se tenha a probabilidade de 1%, 50% e 99% de ocorrência de danos estruturais, morte por hemorragia pulmonar e ruptura de tímpanos. As equações de Probit (AIChE, 2000) para cada tipo de dano, rearranjadas da Tabela 6, estão apresentadas a seguir.

A equação 20 representa a Equação de Probit, para morte por hemorragia.

$$Po(y1) = e^{-\frac{y1+77,1}{6,91}} \quad (20)$$

A equação 21 representa a Equação Probit, para danos estruturais.

$$Po(y2) = e^{-\frac{y2+23,8}{2,92}} \quad (21)$$

A equação 22 representa a Equação de Probit, para ruptura de tímpanos:

$$Po(y3) = e^{-\frac{y3+16,2}{1,524}} \quad (22)$$

#### 5.2.3.1. Cálculo para probabilidade de ocorrência de 1% do dano

A equação 23 é aplicada para o cálculo da sobrepressão em [Pa] necessária para se ter 1% de probabilidade de morte:

$$Po1\%(y1) = e^{-\frac{y1+77,1}{6,91}} \quad (23)$$

Y1 = 2,67 (Tabela 7)

$$Po1\% (y1) = 1,0317 \times 10^5 \times N/m^2$$

A equação 24 é aplicada para o cálculo da sobrepressão em [Pa] necessária para se ter 1% de probabilidade de danos estruturais.

$$Po1\%(y2) = e^{-\frac{y2+23,8}{2,92}} \quad (24)$$

Y2 = 2,67 (Tabela 7)

$$Po1\%(y2) = 8,6479 \times 10^3 \text{ x N/m}^2$$

A equação 25 é aplicada para o cálculo da sobrepressão em [Pa] necessária para se ter 1% de probabilidade de ruptura de tímpanos.

$$Po1\%(y3) = e^{-\frac{y3+16,2}{1,524}} \quad (25)$$

Y3 = 2,67 (Tabela 7)

$$Po1\%(y3) = 2,2464 \times 10^4 \text{ x N/m}^2$$

### 5.2.3.2. Cálculo para probabilidade de ocorrência de 50% do dano

A equação 26 é aplicada para o cálculo da sobrepressão em [Pa] necessária para se ter 50% de probabilidade de morte.

$$Po50\%(y1) = e^{-\frac{y1+77,1}{6,91}} \quad (26)$$

Y1 = 5,00 (Tabela 7)

$$Po50\%(y1) = 1,4454 \times 10^5 \text{ x N/m}^2$$

A equação 27 é aplicada para o cálculo da sobrepressão em [Pa] necessária para se ter 50% de probabilidade de danos estruturais.

$$Po50\%(y2) = e^{\frac{y2+23,8}{2,92}} \quad (27)$$

Y2 = 5,00 (Tabela 7)

$$Po50\%(y2) = 1,9207 \times 10^4 \text{ x N/m}^2$$

A equação 28 é aplicada para o cálculo da sobrepressão em [Pa] necessária para se ter 50% de probabilidade de ruptura de tímpanos.

$$Po50\%(y3) = e^{\frac{y3+16,2}{1,524}} \quad (28)$$

Y3 = 5,00 (Tabela 7)

$$Po50\%(y3) = 1,0363 \times 10^5 \text{ x N/m}^2$$

### 5.2.3.3. Cálculo para probabilidade de ocorrência de 99% do dano

A equação 29 é aplicada para o cálculo da sobrepressão em [Pa] necessária para se ter 99% de probabilidade de morte.

$$Po99\%(y1) = e^{\frac{y1+77,1}{6,91}} \quad (29)$$

Y1 = 7,33 (Tabela 7)

$$Po99\%(y1) = 2,0251 \times 10^5 \text{ x N/m}^2$$

A equação 30 é aplicada para o cálculo da sobrepressão em [Pa] necessária para se ter 99% de probabilidade de danos estruturais.

$$Po99\%(y2) = e^{\frac{y2+23,8}{2,92}} \quad (30)$$

Y2 = 7,33 (Tabela 7)

$$Po99\%(y2) = 4,2658 \times 10^4 \times N/m^2$$

A equação 31 é aplicada para o cálculo da sobrepressão em [Pa] necessária para se ter 99% de probabilidade de ruptura de tímpanos.

$$Po99\%(y2) = e^{-\frac{y^3+16,2}{1,524}} \quad (31)$$

Y3 = 7,33 (Tabela 7)

$$Po99\%(y3) = 4,7803 \times 10^5 \times N/m^2$$

#### 5.2.4 . Determinação das distâncias

Os cálculos desenvolvidos nos itens a seguir se destinam à determinação da distância alcançada por uma onda de choque nos níveis de sobrepressão determinados no item 5.2.3.1, 5.2.3.2, 5.2.3.3.

##### 5.2.4.1 *Distância em [m] para 1% de ocorrência dos danos.*

A equação 32 é aplicada para o cálculo da distância em que se tem 1% de ocorrência de morte:

$$Dist8(z) = Picopress8 (Z) - 1,032 \times 10^5 \quad (32)$$

Para Z=50 (FERREIRA, 2005).

Logo,

$$\text{root}(Dist8(z),z) = 73,7378m$$

A equação 33 é aplicada para o cálculo da distância em [m] para 1% de ocorrência de danos estruturais:

$$\text{Dist8}(z) = \text{Picopress8}(Z) - 8,648 \times 10^3 \quad (33)$$

Para  $Z=100$  (FERREIRA, 2005).

$$\text{root}(\text{Dist8}(z),z) = 337,6962\text{m}$$

A equação 34 é aplicada para o cálculo da distância em [m] para 1% de ocorrência ruptura de tímpanos:

$$\text{Dist8}(z) = \text{Picopress8}(Z) - 2,246 \times 10^4 \quad (34)$$

Para  $Z=80$  (FERREIRA, 2005).

$$\text{root}(\text{Dist8}(z),z) = 179,7019\text{m}$$

#### 5.2.4.2 *Cálculos de distância em [m] para 50% de ocorrência dos danos.*

A equação 35 é aplicada para o cálculo da distância em que se tem 50% de ocorrência de morte:

$$\text{Dist8}(z) = \text{Picopress8}(Z) - 1,445 \times 10^5 \quad (35)$$

Para  $Z=55$  (FERREIRA, 2005).

Logo,

$$\text{root}(\text{Dist8}(z),z) = 62,3153\text{m}$$

A equação 36 é aplicada para o cálculo da distância em que se tem 50% de ocorrência de danos estruturais:

$$\text{Dist8}(z) = \text{Picopress8}(Z) - 1,921 \times 10^4 \quad (36)$$

Para  $Z=40$  (FERREIRA, 2005).

Logo,

$$\text{root}(\text{Dist8}(z),z) = 156,3782\text{m}$$

A equação 37 é aplicada para o cálculo da distância em que se tem 50% de ocorrência ruptura de tímpanos:

$$\text{Dist8}(z) = \text{Picopress8}(Z) - 1,036 \times 10^5 \quad (37)$$

Para  $Z=20$  (FERREIRA, 2005).

Logo,

$$\text{root}(\text{Dist8}(z),z) = \text{valor desprezível}$$

#### 5.2.4.3 *Distância em que se tem 99% de ocorrência dos danos*

A equação 38 é aplicada para o cálculo da distância em que se tem 99% de morte total de pessoas:

$$\text{Dist8}(z) = \text{Picopress8}(Z) - 2,205 \times 10^5 \quad (38)$$

Para  $Z=55$  (FERREIRA, 2005).

Logo:

$$\text{root}(\text{Dist8}(z),z) = 56,1558\text{m}$$

A equação 39 é aplicada para o cálculo da distância em [m] para 99% de destruição das instalações.

$$\text{Dist8}(z) = \text{Picopress8} (Z) - 4,2 \times 10^4 \quad (39)$$

Para Z=80 (FERREIRA, 2005).

Logo:

$$\text{root} (\text{Dist8}(z),z) = 128,5986\text{m}$$

A equação 40 é aplicada para o cálculo da distância em [m] para 99% para ruptura total dos tímpanos.

$$\text{Dist8}(z) = \text{Picopress8} (Z) - 4,78 \times 10^5 \quad (40)$$

Para Z=20 (FERREIRA, 2005).

$$\text{root} (\text{Dist8}(z),z) = \text{valor desprezível}$$

É importante ressaltar que as explosões modeladas com o método Multi-Energia (TNO, 1997), para o nível de sobrepressão relativo à probabilidade de 99% de ocorrência de danos, condicionadas a obstáculos aproximados pela curva 8, não oferece riscos auriculares a pessoas presentes nas proximidades da instalação.

Com base nos resultados obtidos para probabilidade de 1% de ocorrência de danos, pode-se concluir que, para regiões onde se têm grande número de obstáculos (curva 8), uma explosão de 844,87 kg de gás-inflamável não oferece riscos de morte por hemorragia pulmonar a partir de 74m ao centro da explosão; não oferece riscos aos tímpanos a partir de 180m do centro da explosão; não oferece riscos de danos a estruturas (universidade, por exemplo) a partir de 338 m do centro da explosão.

### 5.2.5 Determinação do tempo de duração da fase positiva

A equação 41 é aplicada para o cálculo do tempo determinado para probabilidade de morte de 1%:

$$\text{Temtp8}(z) = \frac{R_s}{V_s} \times \text{tp8}\left(\frac{z}{R_s}\right) \quad (41)$$

Logo,

$$\text{Temtp8}(73,74) = 0,0700\text{s}$$

A equação 42 é aplicada para o cálculo do tempo determinado para probabilidade de danos a estruturas de 1%:

$$\text{Temtp8}(z) = \frac{R_s}{V_s} \times \text{tp8}\left(\frac{z}{R_s}\right) \quad (42)$$

Logo,

$$\text{Temtp8}(337,7) = 0,1134\text{s}$$

A equação 43 é aplicada para o cálculo do tempo determinado para probabilidade de ruptura de tímpanos de 1%:

$$\text{Temtp8}(z) = \frac{R_s}{V_s} \times \text{tp8}\left(\frac{z}{R_s}\right) \quad (43)$$

Logo,

$$\text{Temtp8}(179,7) = 0,0983\text{s}$$

A equação 44 é aplicada para o cálculo do tempo determinado para probabilidade de morte de 50%:

$$\text{Temtp8}(z) = \frac{R_s}{V_s} \times \text{tp8}\left(\frac{z}{R_s}\right) \quad (44)$$

Logo,

$$\text{Temtp8}(62,3152) = 0,0644\text{s}$$

A equação 45 é aplicada para o cálculo do tempo determinado para probabilidade de danos a estruturas de 50%:

$$\text{Temtp8}(z) = \frac{R_s}{V_s} \times \text{tp8}\left(\frac{z}{R_s}\right) \quad (45)$$

Logo,

$$\text{Temtp8}(156,3782) = 0,0942s$$

A equação 46 é aplicada para o cálculo do tempo determinado para probabilidade de ruptura de tímpanos de 50%:

$$\text{Temtp8}(z) = \frac{R_s}{V_s} \times \text{tp8}\left(\frac{z}{R_s}\right) \quad (46)$$

Logo,

$$\text{Temtp8}(0) = \text{valor desprezível}$$

A equação 47 é aplicada para o cálculo do tempo determinado para probabilidade de morte de 99%:

$$\text{Temtp8}(z) = \frac{R_s}{V_s} \times \text{tp8}\left(\frac{z}{R_s}\right) \quad (47)$$

Logo,

$$\text{Temtp8}(56,16) = 0,0611s$$

A equação 48 é aplicada para o cálculo do tempo determinado para probabilidade de danos a estruturas de 99%:

$$\text{Temtp8}(z) = \frac{R_s}{V_s} \times \text{tp8}\left(\frac{z}{R_s}\right) \quad (48)$$

Logo,

$$\text{Temtp8}(128,5986) = 0,0866s$$

A equação 49 é aplicada para o cálculo do tempo determinado para probabilidade de ruptura de tímpanos de 99%:

$$\text{Temtp8}(z) = \frac{R_s}{V_s} \times \text{tp8}\left(\frac{z}{R_s}\right) \quad (49)$$

Logo,

$$\text{Temtp8}(0) = \text{valor desprezível}$$

Portanto, para uma explosão de nuvem de vapor inflamável de um volume de mistura estequiométrica ar-vapor inflamável de 30.000m<sup>3</sup> ou o equivalente a se ter uma explosão de uma massa de 844,87 kg de metano, usando o método Multi-Energia, obtém-se distâncias seguras de 338m, para construção de instalações. Para a permanência de pessoas na região, foi obtida uma distância segura de 74m para a não ocorrência de morte por hemorragia e, a distância adequada para que não ocorra a ruptura de tímpanos é de 180m.

Os valores de distância segura comentados e os tempos de duração da fase positiva encontram-se na Tabela 16.

Os tempos de duração de fase positiva obtidos para sobrepressão correspondente à probabilidade de ocorrência do dano de 1%, foram de 0,1134s para colapso de estruturas, 0,0700s para morte e de 0,0983s para ruptura de tímpanos.

Para as sobrepressões de 1% de letalidade, gerada por ocorrência dos danos, obtém-se as distâncias para destruição total de estruturas de 338m, 74m para morte e 180m para surdez.

Os níveis de sobrepressão relativos à probabilidade de 50% de ocorrência dos danos fornecem as distâncias para destruição total de estruturas de 157m, e 63m para morte. Os tempos de duração de fase positiva foram 0,0942s para colapso de estruturas e 0,0644s para morte.

Aplicando o método Multi-Energia para os níveis de sobrepressão relativos à probabilidade de 99% de ocorrência dos danos, as distâncias para destruição total de estruturas obtida foi de 129m e de 57m para morte.

Na Tabela 16, encontram-se os valores das distâncias seguras e tempo de duração da fase positiva para a ocorrência dos danos de 1%, 50% e 99%.

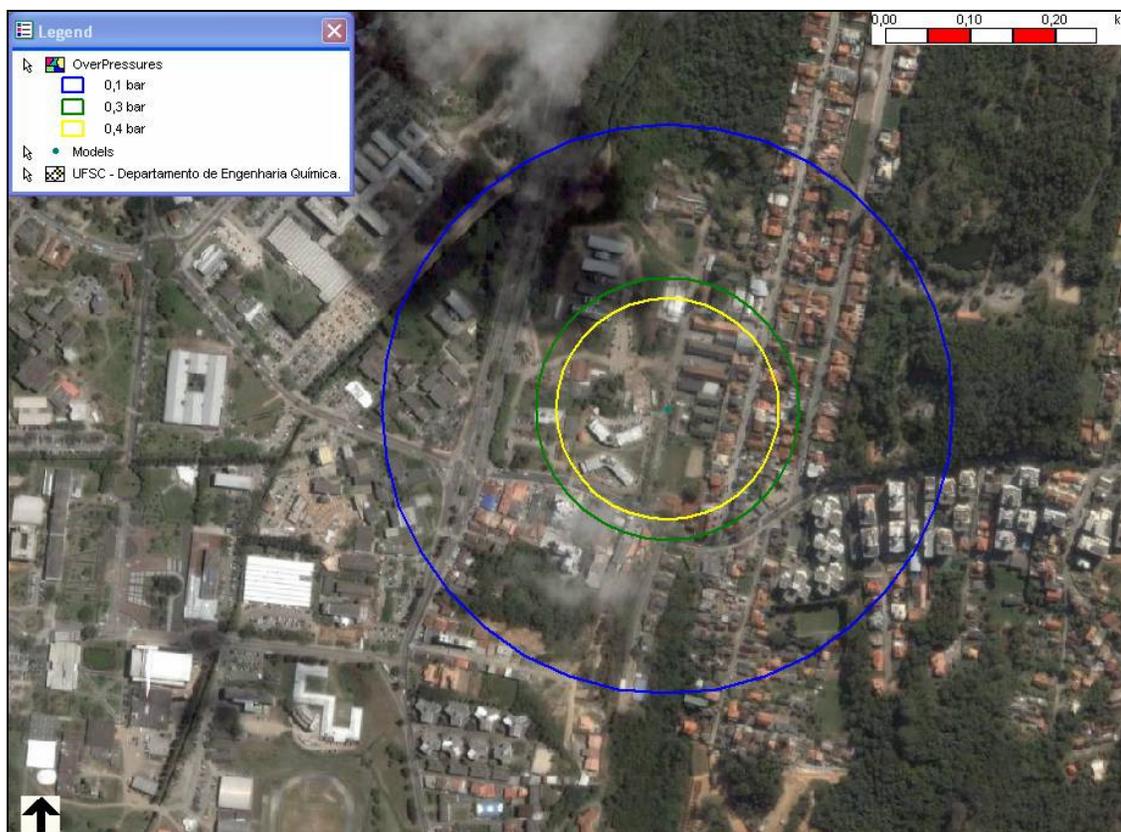
**Tabela 16:** Distância segura e tempo da duração de fase positiva, para um volume de gás ocupado de 30.000m<sup>3</sup> de Metano.

Ocor.	Efeito	Distância segura (m)	Tempo de duração da fase positiva da onda de choque (s)
1%	Colapso de estruturas	338	0,1134
	Morte por hemorragia pulmonar	74	0,070
	Rupturas de tímpanos	180	0,0983
50%	Colapso de estruturas	156	0,0942
	Morte por hemorragia pulmonar	62	0,0644
	Rupturas de tímpanos	-	-
99%	Colapso de estruturas	129	0,0866
	Morte por hemorragia pulmonar	56	0,0611
	Rupturas de tímpanos	-	-

Os tempos de duração de fase positiva obtidos para sobrepressão correspondente a probabilidade de ocorrência do dano de 99%, foram: 0,0866s para colapso de estruturas, 0,0611s para morte.

Observa-se que os ambientes caracterizados pelo grau de confinamento do local e nível de sobrepressão, correspondente à probabilidade de ocorrência do dano de 50% e 99%, não oferecem riscos de surdez.

A Figura 15 apresenta os maiores alcances de sobrepressão identificados na APP (Figura 14 e Tabela 15) sobreposto no layout da área do local do vazamento.



**Figura 15:** Maiores alcances de sobrepressão.

#### Legenda

Sobrepressão (bar)	Dano Esperado
0,13	Colapso parcial das paredes e telhados das casas.
0,27	Ruptura de construções industriais “leves” cobertas.
0,34 – 0,48	Destruição quase total das casas.

**Obs.:** O ponto na cor verde representa o local do vazamento.

### 5.3 Modelagem Através do *Software* PHAST (versão 6.53.1)

Este item tem com objetivo mostrar os passos da modelagem através da utilização do *Software* PHAST (versão 6.53.1) (reconhecido internacionalmente) a

partir dos dados de entrada (Tabela 15). Serão apresentados os resultados das modelagens, programações realizadas no *Software* PHAST (versão 6.53.1) (DNV Technica, 2008, 2002, 1997, 1995a, 1995b) para os cálculos de efeitos a estruturas e pessoas com os modelos coletados das publicações do TNO (2005) e da AIChE (2000).

A Figura 16 apresenta a janela inicial do *Software* correspondente aos dados do produto (Material).

The screenshot shows the 'Vessel/Pipe : Gasoduto- Gás Natural.' window in the PHAST software. The 'Material' tab is active. The 'Discharge Material' section contains a table with one entry: METHANE (CAS Id: 74828, Scope: Global). Below this, the 'Inventory' section has 'Mass' selected with a value of 2,264E6 kg, and 'Volume' selected with a value of 3E4 m3. The 'Process Conditions' section shows 'Temperature' set to 25 degC and 'Pressure (gauge)' set to 100 bar. The 'Phase' is 'Vapor' and 'Fluid Type' is 'Pressurized gas'. The 'Material to Track' section also contains one entry: METHANE (CAS Id: 74828). At the bottom, there is a 'Notes' field and buttons for 'OK', 'Cancelar', and 'Ajuda'.

Name	CAS Id	Scope
METHANE	74828	Global

Inventory:  Mass 2,264E6 kg  Volume 3E4 m3

Process Conditions:  
Temperature: 25 degC  
Pressure (gauge): 100 bar  
Phase: Vapor  
Fluid Type: Pressurized gas

Name	CAS Id
METHANE	74828

**Figura 16:** Janela inicial do *Software* correspondente aos dados do produto (Material).

Sabe-se que o Gás Natural é uma mistura de hidrocarbonetos, sendo aproximadamente 100% (segurança) desta mistura composta pelo metano; desta forma utilizou-se o metano como gás inflamável nas modelagens.

O cenário do risco identificado na APP (Figura 14 e Tabela 15) é um cenário do tipo *leak* (vazamento na linha), o qual representa o cenário de vazamento em linha; a fase do gás é vapor devido às condições de operação (Tabela 15); o vazamento é externo e o diâmetro do furo é de 0,254m, conforme apresentado na Figura 17.

The screenshot shows a software window titled "Vessel/Pipe : Gasoduto- Gás Natural." with a tabbed interface. The "Scenario" tab is active. The window contains several sections of controls:

- Scenario Type:** Radio buttons for "Catastrophic Rupture", "Leak" (selected), "Vent from Vapor Space", "Line Rupture", "Fixed Duration", "Long Pipeline", "Disc Rupture", "Relief Valve", and "Tank Roof Failure".
- Outdoor / In-Building Release:** Radio buttons for "Outdoor Release" (selected) and "In-Building Release", with a checkbox for "Droplets Trapped".
- Building Wake Effect:** Checkboxes for "Roof / Lee Effect" and "Chimney Effect".
- Phase to be Released:** Radio buttons for "Vapor" (selected), "Liquid", and "Two-Phase".
- Tank Roof Effect:** Radio buttons for "Roof Collapsed" and "Roof Removed".
- Model Effect:** A dropdown menu set to "Instantaneous effects".
- Basic scenario data:** Input fields for "Hole Diameter" (10 in), "Gas Volume Flow" (m<sup>3</sup>/hr), "Pump Head" (m), "Duration (for fixed duration releases)" (600 s), and "Vessel burst pressure used in fireball calculations(g)" (bar). There are checkboxes for "Pump Head" and "Vessel burst pressure used in fireball calculations(g)".
- Notes:** A text area for notes.
- Buttons:** "OK", "Cancelar", and "Ajuda" at the bottom.

**Figura 17:** Segunda janela do *Software* correspondente ao cenário identificado na Tabela 15.

É sabido que o duto é enterrado; portanto, não há elevação da linha conforme se pode observar na janela de localização ilustrada na Figura 18.

**Vessel/Pipe : Gasoduto- Gás Natural.**

**Material | Scenario | Pipe | Vessel | Location | Geometry | Bund Data | Indoor**

Release

Elevation  m ▶

Distances for radiation modeling and dispersion scope

Distances    m ▶

Concentration for terminating dispersion

Concentration of interest  ppm ▶

Uses averaging time  s

Averaging times to be used in reports

User-defined  s

Toxics

ERPG (1 hr)  IDLH (30 mins)  STEL (15 mins)

**Notes:**

OK Cancelar Ajuda

**Figura 18:** Janela de localização do cenário.

A Figura 19 apresenta a direção do vazamento a qual foi considerada na vertical.

**Vessel/Pipe : Gasoduto- Gás Natural.**

**Pipe | Vessel | Location | Geometry | Bund Data | Indoor/Outdoor | Flammab**

Outdoor Release  
Direction: Vertical by 45 deg

In-Building Release  
 Natural Ventilation: Air changes 3 /hr  
 Forced Ventilation: Vent Location, Exhaust Diameter m, Vent Flowrate m<sup>3</sup>/hr

Building Size and Orientation  
Height m, Width m, Length m, Building Angle deg, Wind Angle deg, Chimney Height m, Chimney Diameter m

Notes:

OK Cancelar Ajuda

**Figura 19:** Janela Indoor/Outdoor.

O método utilizado para o cálculo da explosão é o Multi-Energia selecionado na janela Flammable (Figura 20). O método selecionado de incêndio em jato não interferirá nos cálculos de vulnerabilidade e nem o fator de modificação da explosão da massa.

The screenshot shows a software window titled "Vessel/Pipe : Gasoduto- Gás Natural." with a blue title bar. The window has several tabs: "Vessel", "Location", "Geometry", "Bund Data", "Indoor/Outdoor", "Flammable", and "T0". The "Flammable" tab is active. Inside the window, there are two groups of radio buttons: "Explosion Method" with options "TNT", "TNO Multi-Energy" (selected), and "Baker-Strehlow"; and "Jet Fire Method" with options "API" and "Shell" (selected). Below these is a text input field for "Early Explosion Mass Modification Factor" containing the value "3". There is also a checkbox for "Use Late Ignition Location" which is unchecked, with a text input field next to it containing "90" and the unit "m". At the bottom of the window, there is a "Notes:" section with a text area and three buttons: "OK", "Cancelar", and "Ajuda".

**Figura 20:** Janela *Flammable*.

O método utilizado para o cálculo da explosão é o Multi-Energia (Figura 21); o grau de confinamento e a fração da nuvem é 8 devido às edificações próximo ao cenário do vazamento.

Vessel/Pipe : Gasoduto- Gás Natural.

Flammable Toxic parameters TNT **Multi Energy** Baker Strehlow Disc

Unconfined Strength 1

Confined Blast Sources

	Confined Strength	<input type="radio"/> Confined Volume	<input checked="" type="radio"/> Confined Fraction
<input checked="" type="checkbox"/> Source 1	8	3E4 m3	0,8 fraction ▶
<input type="checkbox"/> Source 2	8	3E4 m3	fraction
<input type="checkbox"/> Source 3	5	3E4 m3	fraction
<input type="checkbox"/> Source 4		m3	fraction
<input type="checkbox"/> Source 5		m3	fraction
<input type="checkbox"/> Source 6		m3	fraction
<input type="checkbox"/> Source 7		m3	fraction

Notes:

OK Cancelar Ajuda

Figura 21: Janela do Método Multi-Energia.

Na janela Discharge (Figura 22), apresentam-se os resultados da modelagem da descarga do gás inflamável .

**User Defined Source : Gasoduto- Gás Natural...**

**Material Discharge Location Geometry Bund Data Indoor/Outdoor Fla**

Release Scenario

- Leak
- Catastrophic Rupture
- Pool Source (Velocity)
- Pool Source (Radius)

Outdoor / In-Building Release

- Outdoor Release
- In-Building Release  Droplets Trapped

Building Wake Effect

- Roof / Lee Effect  Chimney Effect

Add Segment Delete Segment .....Release Segments.....

		1
Release Phase		Vapor
Release Rate	kg/s	843,6
Discharge Velocity	m/s	500
Final Temperature	degC	-81,49
Duration of Discharge	s	5
Liquid Fraction	fractio	0
Droplet Diameter	um	0
Pool Radii	m	
Pre-Dilution Air Rates	kg/s	0
Pre-Dilution Air Masses	kg	
Diluted Phase		Vapor
Diluted Temperature	degC	-81,4901

The properties above are for the release phase without air entrainment

Vessel burst pressure used in fireball calculations (g)  bar ▶

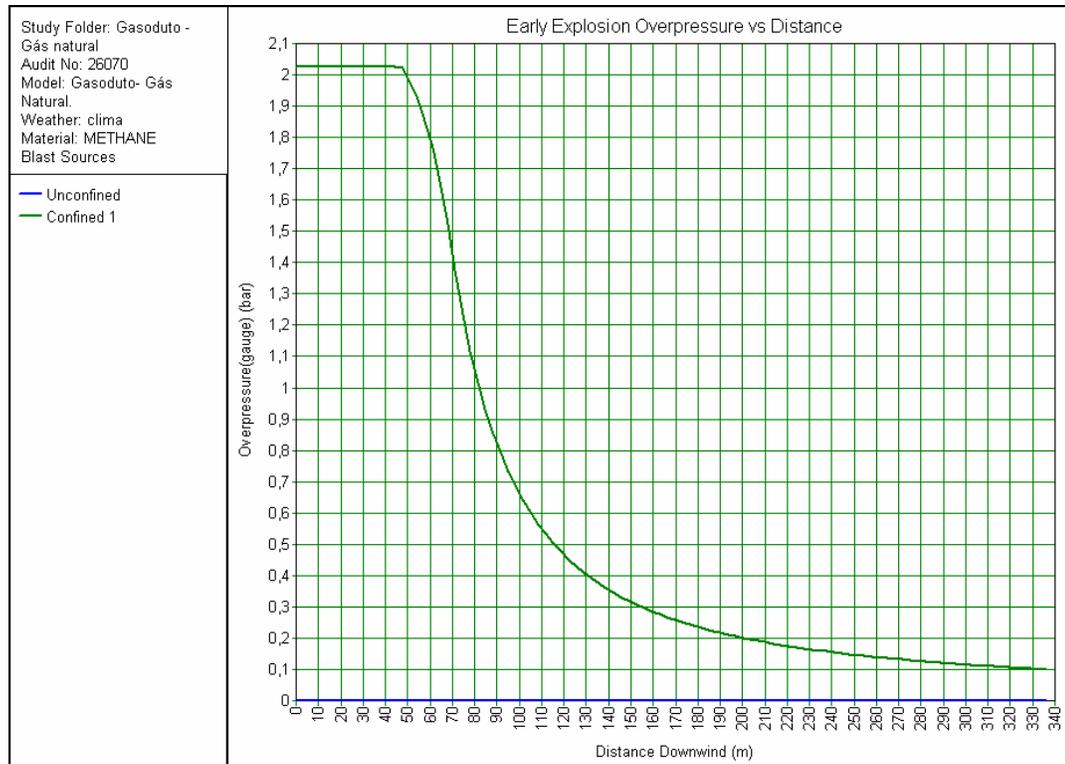
**Notes:**

OK Cancelar Ajuda

**Figura 22:** Janela Discharge.

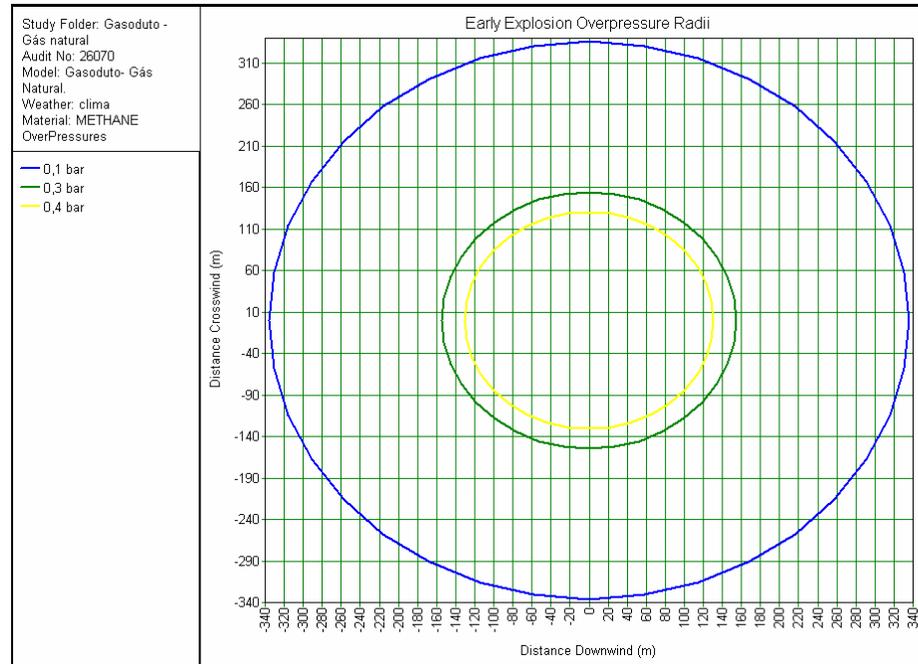
Com todos os dados modelados, o cenário foi simulado pelo PHAST. Desta forma calcula-se a taxa de vazamento do gás que é de 843,6kg/s.

Com o cenário estabelecido, é possível analisar o comportamento da sobrepressão pela distância alcançada conforme apresentado na Figura 23.



**Figura 23:** Comportamento da nuvem em relação à sobrepressão e à distância alcançada.

Na Figura 24 é possível observar os maiores alcances gerados pela sobrepressão de 0,1, 0,3 e 0,4 bar.



Sobrepressão (bar)	Alcance
0,1	336,027 m
0,3	154,732 m
0,4	130,696 m

**Figura 24:** Maiores alcances gerados pela sobrepressão de 0,1, 0,3 e 0,4 bar.

Os alcances dos danos calculados para o Gás Natural estão relacionados com os valores referência descritos de acordo com o CETESB (2003).

- a) Sobrepressão de 0,1 bar..... 1% de letalidade.
- b) Sobrepressão de 0,3 bar..... 50% de letalidade.
- c) Sobrepressão de 0,4 bar..... 99% de letalidade.

Por meio do *Software* é possível extrair estes dados através de um relatório de saída, conforme apresentado na Figura 25.

**Explosion Effects: Early Explosion**

**Path:** \Gasoduto - Gás natural\UFSC\Leak(P-100)\Gasoduto- Gás Natural.

Early Explosions are assumed to be centered at the release location  
Explosion Model Used : Multi Energy

			clima
Supplied Flammable Mass	kg		4218,11
			Distance (m) at Overpressure Levels
			clima
Overpressure	0,1	bar	336,027
Overpressure	0,3	bar	154,732
Overpressure	0,4	bar	130,696

**Figura 25:** Dados do relatório de saída.

#### 5.4. Cálculo do Alcance do Fragmento

A seguir é apresentada uma estimativa dos alcances máximos que um fragmento decorrente de uma explosão em um duto de 10" pode alcançar.

O cálculo de míssil é representado por duas meia-calhas do gasoduto de 10" com 2 metros de comprimento, sendo projetado devido à perda da resistência estrutural por corrosão.

Para realização destes cálculos, foi utilizada a metodologia apresentada pelo CCPS (1994).

Foram consideradas para o cálculo as seguintes condições:

- Rompimento de 2 m do duto de 10"
- Liberação de 2 fragmentos (duas meia-calhas)
- Espessura da parede do duto: 0,625"
- Pressão de ruptura do vaso: 100 bar
- Massa estimada do fragmento: 300 kg

Determinação da velocidade inicial do fragmento pela equação de Moore (AIChE, 2000) (equação 50):

$$u = 2.05 \cdot \sqrt{\frac{P \cdot D}{W}} \quad (50)$$

onde:

$u$  = velocidade inicial do fragmento (ft/s)

$P$  = pressão de ruptura do vaso (psig)

$D$  = diâmetro do fragmento (polegadas)

$W$  = massa do fragmento (lb)

Substituindo os valores na equação 50, tem-se:

$$u = 96,00 \text{ ft/s} = 29,26 \text{ m/s} \quad (51)$$

A determinação da velocidade escalar é dada pela equação 52:

$$\bar{U} = \frac{\rho \cdot C_d \cdot A_d \cdot u}{W \cdot g} \quad (52)$$

onde:

$\bar{u}$  = velocidade escalar (adimensional)

$u$  = velocidade inicial (L/t)

$\rho$  = massa específica da atmosfera ambiente ( $M/L^3$ )

$C_d$  = coeficiente de arrasto (adimensional)

$A_d$  = área exposta no plano perpendicular da trajetória ( $L^2$ )

$W$  = massa do fragmento (M)

$g$  = aceleração da gravidade ( $L/t^2$ )

Foram considerados:

$$C_D = 2,05 \text{ [CCPS, 1994 – Tabela 2.26].}$$

Substituindo os valores na equação 52, obtém-se

$$\bar{U} = 0,0248 \quad (53)$$

A determinação do alcance do fragmento é dada pela equação 54:

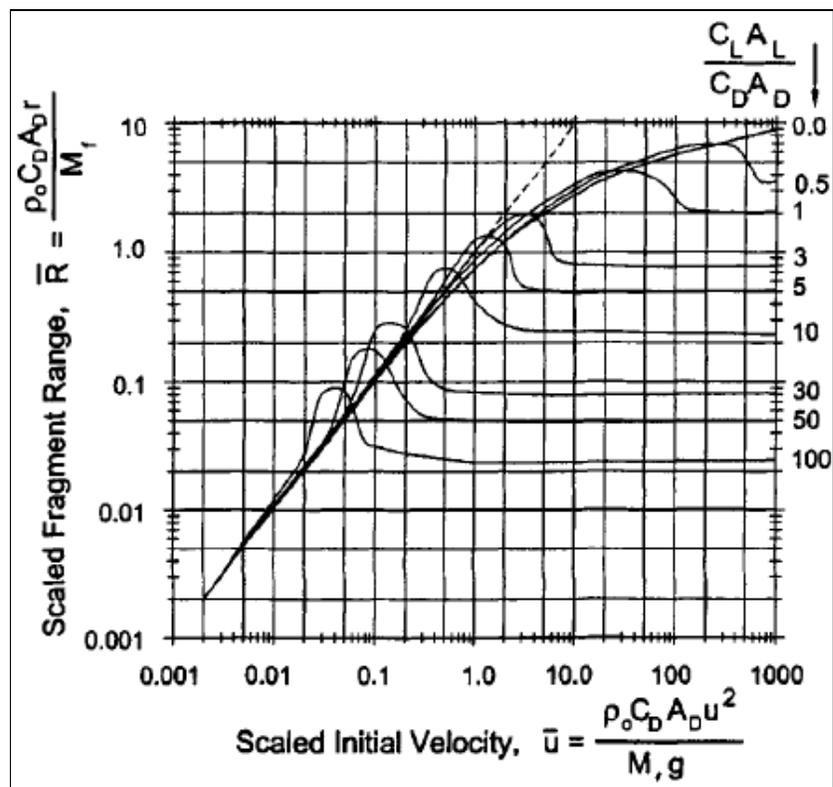
$$r = \frac{Wx\bar{R}}{\rho x C_d x A_d} \quad (54)$$

onde:

$r$  = alcance do fragmento (L)

$\bar{R}$  = alcance escalar máximo (adimensional)

Na Figura 26 é apresentado o alcance escalar do fragmento versus distância inicial escalar.



**Figura 26:** Alcance escalar do fragmento versus distância inicial escalar.

Determinação do alcance escalar máximo por meio da Figura 26:

Foram considerados:

$$\frac{ClAl}{CdxAd} = 0 \quad (55)$$

Conforme AIChE (2000) e CCPS (1994), para fragmentos disformes, normalmente é esperado  $C_L = 0$ .

onde:

$C_L$  = coeficiente de elevação

Utilizando o gráfico da Figura 26, tem-se:

$$\bar{R} = 0,04 \quad (56)$$

Substituindo os valores na equação 54, tem-se que o alcance do fragmento é:

$$(r) = 141 \text{ m} \quad (57)$$

Este alcance de míssil pode ser causado por explosão física de equipamentos de alta pressão que venham a perder sua resistência estrutural, ou seja, devido à redução de espessura da parede da tubulação ou aumento de pressão de trabalho.

Os riscos poderão ser agravados com o processamento de Gás Natural com contaminantes corrosivos, ausência de elementos de segurança que impede pressões acima da pressão de projeto. Portanto, com estas medidas, torna-se remoto qualquer evento capaz de causar uma explosão física das tubulações da instalação devido ao aumento de pressão de operação.

O resultado indica um alcance aproximado de 141m para este míssil, porém este resultado não é representativo pelas seguintes razões:

- a. Os modelos existentes são apenas experimentais; não possuem suporte teórico;
- b. Os modelos disponíveis representam vasos de pressão e não gasodutos;
- c. Existem poucas experimentações para resultados confiáveis;

- d. Não é reconhecido um modelo específico para gasodutos;
- e. Não se observa tal estimativa em estudos de riscos de Gasodutos, no exterior;
- f. Os Órgãos Ambientais Brasileiros não requerem estimativas de mísseis.

A seguir serão apresentadas as principais conclusões obtidas nesta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes aos resultados dos efeitos de explosões de nuvem de gás com base no método Multi-Energia, tendo como base o modelo de vulnerabilidade de Eisenberg em um gasoduto, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

O objetivo principal deste trabalho foi utilizar técnicas de análises de riscos para estimar os alcances de explosão em caso de um possível vazamento de Gás Natural em um gasoduto, para avaliar se o local a ser instalado o gasoduto (próximo ao Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina) oferece riscos ao entorno das instalações de modo a se ter probabilidade de colapso de estruturas, morte e danos aos tímpanos e as distâncias destrutivas e letais.

Foi selecionado cenário de acidente envolvendo explosão de nuvem de metano em um gasoduto. O cenário de acidente escolhido para representar situações típicas foram explosões em caso de ruptura catastrófica do duto.

Depois de identificar o risco e de analisar os efeitos deste risco, os resultados deste trabalho mostraram, por meio de cálculos matemáticos e simulações, que a distância segura livre de qualquer risco é a partir de 338 m.

Na temperatura ambiente, os inventários de material inflamável, necessários para se ter explosão na parte congestionada pela presença de equipamentos nas áreas de processo, seriam de 844,87 kg de metano, para o volume de 30.000m<sup>3</sup>.

A distância segura para probabilidade de danos materiais de 1% para o volume livre usado é de 338 metros. A distância segura para probabilidade de morte de 1% é de 74 metros; já a distância segura para probabilidade de ruptura dos tímpanos de 1% é de 180 metros.

A distância segura para probabilidade de danos materiais de 50% para o volume livre usado é de 157 metros e a distância segura para probabilidade de morte de 50% é de 63 metros.

É observado que o ambiente caracterizado pelo grau de confinamento 8, representativo do local não oferece riscos de surdez para as sobrepressões de 50% e 99%, ou seja, a distância para rompimento total de tímpanos, correspondente às probabilidades de 50% e 99%, não gera riscos.

A distância para desabamento total para probabilidade de colapso de 99% obtida neste trabalho é de 129 metros.

A distância correspondente à probabilidade de morte de 99% é de 57 metros.

As distâncias calculadas pelo método Multi-Energia são determinadas a partir do centro da explosão. Esta observação é importante, pois não se pode garantir que o centro da explosão estará no ponto central da região congestionada. Desta forma, recomenda-se acrescentar, aos valores apresentados, a distância correspondente do centro da instalação de análise. Assim, considerar-se-iam os alcances de explosão a partir da borda da região congestionada. Esta recomendação levaria a um adicional de segurança aos trabalhadores da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) e aos estudantes que circulam no Campus.

O AIChE (2000) propõe que construções mais modernas de instalações devem ser projetadas de modo a otimizarem as condições de controle da unidade de processo e também no que diz respeito à segurança dos trabalhadores que nela permanecem. Os critérios de projeto de um gasoduto devem observar a orientação em relação à unidade produtiva e à localização, além do tipo de construção nas vizinhanças.

Este estudo serve de auxílio para determinar possíveis riscos de morte de populações, ou vilas, instaladas próximas de um gasoduto. É óbvio que, nesse caso, a consequência dependeria do número de pessoas abrigadas ou não abrigadas e se for dia ou noite, pois o indivíduo tem maior chance de falecer se estiver abrigado, especialmente à noite, quando as pessoas estão dormindo dentro de suas casas.

Os resultados deste trabalho mostram, por meio de métodos conceituados (utilizando o Método Multi-Energia e Modelo de Vulnerabilidade de Eisenberg) e simulação através da utilização do *Software* PHAST (versão 6.53.1), que os resultados foram coerentes. A taxa de descarga calculada pelo método Multi-Energia

foi de 844,87kg/s e, pelo software, foi de 843,60kg/s, com uma diferença relativa de 0,15%.

Para os efeitos de probabilidade de danos estruturais de 1%, os resultados obtidos no presente trabalho, pelo método Multi-Energia, forneceram o alcance de 338m e, pela utilização do *Software* PHAST, de 337m, com uma diferença relativa de 0,3%.

Para a probabilidade de danos estruturais de 50%, calculada pelo método Multi-Energia, o alcance foi de 157,0m e, pelo *Software* PHAST, foi de 155m, com uma diferença relativa de 1,29%.

Para a probabilidade de danos estruturais de 99%, calculada pelo método Multi-Energia, o alcance foi de 129,0m e, pelo *Software* PHAST, foi de 131m, com a diferença de 1,53%.

O alcance máximo de um fragmento decorrente de uma explosão em um gosoduto de 10" foi de 141m.

Sugere-se para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Realizar os cálculos com base em outros métodos de efeitos de explosão.
- Realizar uma pesquisa detalhada do impacto ambiental de vazamento de Gás Natural.
- Desenvolver um programa que simule as conseqüências (efeitos físicos) e análise de vulnerabilidade para as hipóteses acidentais.
- Desenvolver os cálculos de risco individual e social.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABS CONSULTING, Consequence Assessment Methods for Incidents Involving Releases from Liquefied Natural Gas Carriers, *131-04 GEMS 1288209*, p. 7-33, 2004.
2. Acidentes em empresa petroquímica. Disponível em: <[www.folha.uol.com.br](http://www.folha.uol.com.br)>. Acesso em: set. 2008.
3. AIChE - AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. *Guidelines for Chemical Transportation Risk Analysis*. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. New York, 2000.
4. AIChE - AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. New York, 1995.
5. AIChE - AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapour Cloud Explosions, Flash Fires, and Bleves*. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. New York, 1994.
6. API - AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Risk-Based Inspection Base Resource Document*. API Publication 581, 2000.
7. ALLINGER, N. L. *et al. Química Orgânica*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1976.

8. BACCARINI, D.; ARCHER, R. *The risk ranking of projects: a methodology*, 1999.
9. BALL, P.D; FLOYD, P. J. *Societal Risk - a report prepared for the Health and Safety Executive*. HSE, 1998.
10. BJERKETVEDT, D. *et al.* Gas Explosion Handbook. *Journal of Hazardous Materials*. v. 52. p. 1-150, 1997.
11. BRITO, A. J.; ALMEIDA, A. T. de. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 94, p.187-198, 2008.
12. CCPS – Center for Chemical Process Safety. *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures*. Second Edition. AIChE – American Institute of Chemical Engineer, 2000.
13. CCPS – Center for Chemical Process Safety. *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fire, and BLEVEs*. AIChE – American Institute of Chemical Engineers, 1994.
14. CPR 14E - Commissie voor de Preventie van Rampen. *Methods for the calculation of physical effects, due to releases of hazardous materials liquids and gases*. v. 2, 825p. Part 1, 451p. Part 2, 1997.
15. CPR 18E – Guidelines for Quantitative Risk Assessment. “Purple Book”, report, *Committee for the Prevention of Disasters*, 1999.
16. CETESB. *Manual de Orientação para a Elaboração de Estudos de Análise de Riscos*. p. 4.261, 2003.

17. CHOU, S. J.; WILLIAMS, M.; JONES, D.; ROSA, C. *Evaluating toxicologic end points to derive minimal risk levels for hazardous substances*, 2001.
18. DNV Technica Software Products Division. Help – PHAST (DNV) v.6.4, Fire – 16/206, 2008.
19. DNV Technica Software Products Division. *SAFETI MICRO*, Versão 6.21 (via digital), 2002.
20. DNV Technica Software Products Division. *PHAST Professional Training Course Manual*, 1997.
21. DNV Technica Software Products Division. *PHAST Professional Manual*. Versão 5.0, 1995a.
22. DNV Technica Software Products Division. *PHAST Professional Manual*. Versão 6.02 (via digital), 1995b.
23. DUARTE, M. *Riscos Industriais: etapas para a investigação e a prevenção de acidentes*. Rio de Janeiro: FUNENSEG, 2002.
24. DZIUBINSKI, M.; FRATCZAK, M.; MARKOWSKI, Y A. Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. v. 19, p. 399-408, 2006.
25. EDULJEE, G.H. *The Science of the Total Environment*. v. 249, p.13-23, 2000a.
26. EDULJEE, G.H. *Trends in Risk assessment and risk management*, 2000b.

27. EGIG - European Gas Pipelines Incident Data Group. *5th Report of the European Gas Pipelines Incident Data Group*, p.1970-2001, 1999.
28. FERREIRA, L. S. Efeitos de explosões de nuvem de gás com base no método Multi-Energia, 2005.
29. FISPQ – Ficha de Informação de segurança de Produto Químico, Gás Natural, N° FISPQ: Pb0027\_P Versão: 0.1P, 2002.
30. FRANK, P; LEES, F. P. Loss prevention in the process industries. *Hazard identification, Assessment and control*, 2<sup>nd</sup> edition, 1996.
31. HARRISON, A. J.; EYRE, J.A. The effect of obstacle arrays on the combustion of large premixed gas/air clouds, *Combustion Science and Technology*, v.27, p. 121-137, 1987.
32. HENSELWOOD, F.; PHILLIPS, G. A matrix-based risk assessment approach for addressing linear hazards such as pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 19, p. 433-441, 2006.
33. HERCO Consultoria de Riscos Ltda. Manual da Análise de Riscos Qualitativa e Quantitativa, 2008.
34. HERCO Consultoria de Riscos Ltda. Manual Análise de Riscos. Notas de Reunião, 2007.
35. HERCO Consultoria de Riscos Ltda. Banco de Dados, MSDS – Fichas de Emergência, 2006.

36. HILL, R. T; CATMUR, J. R., Risk From Hazardous Pipelines in the United Kingdom – HSE Contract Research Report, n. 82, 1994.
37. ISAAC, I. *Training in risk management*, 1995.
38. JARRETT, D. E. Derivation of the British explosives safety distances. *Annals of the New York Academy of Sciences*. v. 152, 1968.
39. LEES, F. P. *Loss Prevention in the Process Industries, Hazard Identification, Assessment and Control*. 2<sup>nd</sup> Edition, London, 1996.
40. Limites de Inflamabilidade do metano. Disponível em: <[www.pantanalenergia.com.br](http://www.pantanalenergia.com.br)>. Acesso em: set. 2008.
41. MATAR, S.; HATCH, L. *Chemistry of Petrochemical Processes*, 2. Edition, Gulf Publishing Company, USA, 2000.
42. OFFSHORE TECHNOLOGY REPORT – OTO 1999 079. *Offshore Hydrocarbon Releases Statistics*, 1999.
43. RAZ, T.; MICHAEL, E. *Use and benefits of tools for project risk management*, 1999.
44. SABA, C.; HADDAD, E.; FANTAZZINI, M. L. *Manual do curso sobre Análise de Riscos e Avaliação de Perdas*. ITSEMAP do Brasil, 2006.
45. SCHARDIN, H. *Ziviler Luftschutz*, n.12, p. 291-293, 1954.
46. SERPA, R. R. *Acidentes Industriais Ampliados*, 1<sup>a</sup> Edição, 2002.

47. STREHLOW, R. A.; LUCKRITZ, R.T.; ADAMCZYK, A.A; SHIMPI, S.A. The blast-wave generated by spherical flames, *Combustion and Flame*, v.35, p. 297-310, 1979.
48. TARALLI, G.; SILVA, G. A. da; SIMÕES, R. A. G. *Manual do curso de Gestão Ambiental e Segurança de Processos na Indústria*, 1996.
49. TNO - Methods for the Calculation of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Materials: Liquids and Gases (*the Yellow Book*), Netherlands Organization for Applied Scientific Research, Apeldoorn, The Netherlands – Committee for the Prevention of Disasters, 3rd Edition, 2005.
50. TNO - Methods for the Determination of Possible Damage to people and Objects Resulting from Releases of Hazardous Materials, (*the Green Book*), SZW The Hague: Directorate-General of Labour of the Ministry of Social Affairs and Employment, Committee for the Prevention of Disasters (CPR), Second Edition, 2004.
51. TNO - Guidelines for Quantitative Risk Assessment, (*the Purple Book*), Netherlands Organization for Applied Scientific Research. The Netherlands – Committee for the Prevention of Disasters, 1st Edition, 1999.
52. TNO - Methods for the Calculation of Physical Effects, (*the Yellow Book*), The Netherlands - Committee for the Prevention of Disasters. The Director-General of Labour. Committee for the Prevention of Disasters (CPR14E), 3rd Edition, 1997.
53. TNO - Methods for the Determination of Possible Damage to People and Objects Resulting from Releases of Hazardous Materials, (*the Green Book*), The Netherlands - Committee for the Prevention of Disasters. The Director-General of Labour. Committee for the Prevention of Disasters (CPR 16E), 1992.

54. TWEEDDLE, Conference report on the 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v.2, n.4, p.241, 1989.
55. VAN DEN BERG, A. C. The Multi-Energy method. A framework for vapor cloud explosion blast prediction, *Journal of Hazardous Materials*, v.12, p. 1-10, 1985.
56. VAN DEN BERG, A. C.; VAN, W. C. J. M.; ZEEUWEN, J.P.; PASMEN, H. J. Current research at TNO on vapor cloud explosion modeling. *Int. Conf. on Vapor Cloud Modeling*. Cambridge (MA), USA, p. 687-711, AIChE, New York, 1987.
57. VAN DEN BERG, A.C.; VAN, W. C. J. M. Vapor cloud explosion blast modeling, *International conference and Workshop on Modeling and Mitigation the Consequences of Accidental Releases of Hazardous materials*. New Orleans, USA, p. 21-24, 1991.
58. VAN WINGERDEN, C.J.M. Experimental investigation into the strength of blast-waves generated by vapor cloud explosions in congested areas. *6<sup>th</sup> Int. Symp. on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, Oslo, Norway, 26-1, 26-16, 1989.
59. WIEKEMA, B. J. Vapour cloud explosion model. *Journal of Hazardous Materials*, v. 3, p. 221-232, 1980.
60. WILKENING, H.; BARALDI, D. *CFD modelling of accidental hydrogen release from pipelines*, 2007.
61. YOUNG, D. J.; AHN B. J. *A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas*, 2005.

62. ZEEUWEN, J.P.; VAN, W. C. J. M.; DAUWE, R.M. Experimental investigation into the blast effect produced by unconfined vapor cloud explosions. *4<sup>th</sup> Int. Symp. on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, Harrogate, UK, Chem. E. Symp., n. 80, p. 20-29, 1983.