



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

Erick Braga Ferrão Galante

ESTUDO DOS MODELOS DE AVALIAÇÃO DE RISCO AMBIENTAL

Rio de Janeiro
2011



UFRJ

Erick Braga Ferrão Galante

ESTUDO DOS MODELOS DE AVALIAÇÃO DE RISCO AMBIENTAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Assed Naked Haddad

Rio de Janeiro

2011

Erick Braga Ferrão Galante

Estudo dos Modelos de Avaliação de Risco Ambiental – RJ / Erick Braga Ferrão Galante - 2011.

118f.: il. 16

Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2011.

Orientador: Assed Naked Haddad

1. Risco. 2. Avaliação de Risco ambiental. 3. Equações de Estado. 4. Equações de Probit I. Haddad. II. Assed Naked. III. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. IV. Mestrado.



ESTUDO DOS MODELOS DE AVALIAÇÃO DE RISCO AMBIENTAL

Erick Braga Ferrão Galante

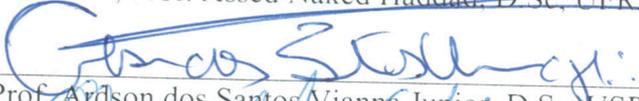
Orientador: Prof. Assed Naked Haddad

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

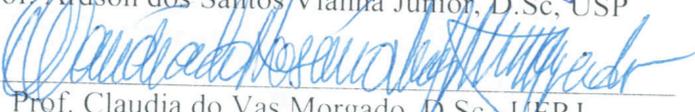
Aprovada pela Banca:



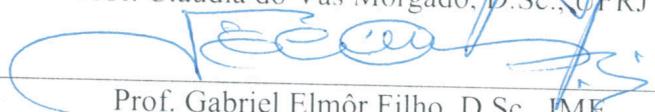
Presidente, Prof. Assed Naked Haddad, D.Sc., UFRJ



Prof. Ardson dos Santos Vianna Junior, D.Sc., USP



Prof. Claudia do Vas Morgado, D.Sc., UFRJ



Prof. Gabriel Elmôr Filho, D.Sc., IME

Rio de Janeiro

2011

Dedico esta dissertação a minha esposa Cristiane pelo carinho, apoio e dedicação. Sem ela ao meu lado nada disto teria sido possível.

AGRADECIMENTO

Agradeço ao meu amigo e orientador, o Professor Assed Naked Haddad por guiar-me neste caminho de pesquisa e conhecimento. Sem o seu incentivo esta jornada não se teria iniciado.

RESUMO

GALANTE, Erick Braga Ferrão. ESTUDO DOS MODELOS DE AVALIAÇÃO DE RISCO AMBIENTAL. Rio de Janeiro, 2011. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

A presente dissertação aborda o problema da análise de risco, qualitativa e quantitativa, discutindo e criticando os princípios de risco, sua gestão e análise. Durante a apresentação do conceito de risco, o mesmo é definido como uma função de três variáveis independentes: frequência, severidade e cenário. Deste ponto, a presente dissertação para a discutir os conceitos de análises quantitativas de risco estabelecidos nas normas ambientais da FEEMA-RJ e CETESB. Deste ponto, a discussão avança para as análises e equações de Probit para realizar as predições de vulnerabilidade. O restante das análises é feito utilizando-se um estudo de caso: explosão mecânica de cilindro contendo fluido combustível, seguida de bola de fogo (BLEVE) O BLEVE é então representado matematicamente por um conjunto de equações de estado, obtidas a partir da física do fenômeno. Neste momento, o modelo físico é comparado e criticado com os resultados de vulnerabilidade esperados quando se aplicam as modelagens de Probit, apontando-se os pontos fortes e fracos de cada método. Dentre as conclusões alcançadas, destaca-se que as equações de Probit não modelam o BLEVE adequadamente, possibilitando estabelecer parâmetros de comparação, enquanto que os modelos matemáticos construídos usando-se equações fundamentais têm maior adesão entre com o evento real, porém elevando os custos (tempo e complexidade, principalmente) da análise.

Palavras Chave: 1. Risco. 2. Avaliação de Risco ambiental. 3. Equações fundamentais. 4. Equações de Probit

ABSTRACT

GALANTE, Erick Braga Ferrão. ESTUDO DOS MODELOS DE AVALIAÇÃO DE RISCO AMBIENTAL. Rio de Janeiro, 2011. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

This work approaches the risk analysis issue, both qualitative and quantitatively, discussing and comparing the principles and concepts of risk, as well as its management and evaluation. Throughout the presentation of the concepts of risk, it is defined as a function of tree independent variable: frequency, severity and scenario. From this point onwards, this work discusses the concepts of risk analysis as presented in some Brazilian standards (FEEMA and CETESB). From that, this work analyses the probit equations as a tool to address the vulnerability of a given event. The remaining analysis is performed via a case of study: mechanical explosion of a fuel cylinder followed by fireball (BLEVE). The BLEVE is written mathematically and its physical model is compared and contrasted against the vulnerability's expected results when one uses probit's equations. Among the conclusion of this works, highlights that the probit equations does not model BLEVE suitably, but allows one to determine its vulnerability. On the other hand, the use of physical models provides results of BLEVE's behavior but at high analysis costs (mainly time consuming and complexity)

Key Words: **1.Risk. 2. Environmental Risk Assessment. 3. Equations of State. 4. Probit Equations.**

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1	Processo de Gestão de Riscos, baseado na NZS 4360:2004	21
Figura 2-2	Processo de Gestão de Riscos baseado na ISO 31000:2009	22
Figura 3-1	Risco Ocupacional vs Risco Ambiental	36
Figura 3-2	Esquema de cenário - Risco Ambiental	37
Figura 4-1	Triângulo do Fogo	60
Figura 4-2	Tetraedro de Fogo	60
Figura 4-3	Modelo de Vela para chama difusiva	63
Figura 4-4	Esquema de Tanque com os fluxos de calor	70
Figura 4-5	Elemento de volume	77
Figura 4-6	Modelo de vela para chama difusiva	81
Figura 4-7	Gota de combustível imersa em ar (aquecido)	82
Figura 4-8	Difusão das espécies e região de chama	82
Figura 4-9	Modelo de queimador de Burke e Schulman	83
Figura 4-10	Condições de contorno para φ_0	87
Figura 5-1	Perfil da difusão de espécies	94
Figura 6-1	Processo de análise e avaliação dos riscos para um BLEVE	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Classificação das ferramentas de análise de risco.....	26
Tabela 3.1	Classificação de Instalações – Modelo FEPAM	33
Tabela 3.2	Critério da CETESB para exigência de Estudo Ambiental de Risco	35
Tabela 3.3	Categorias de Frequência	40
Tabela 3.4	Categorias de Severidade	41
Tabela 3.5	Matriz de Risco (prioridades).....	42
Tabela 3.6	Legenda da Matriz de Riscos	42
Tabela 3.7	Listagem de Símbolos dos Eventos	46
Tabela 3.8	Listagem de Símbolos dos conectivos lógicos	47
Tabela 3.9	Relação entre Probit e a Percentagem de Morte na Área Afetada	51
Tabela 3.10	Radiação Térmica X Efeito	53
Tabela 3.11	Níveis de Sobre pressão e Efeito	55
Tabela 3.12	Parâmetros para determinação de distâncias, conforme CETESB e FEEMA	58

LISTA DE SIMBOLOS

P	Pressão (escalar)
V	Volume (escalar)
n	numero de moles do gás (escalar)
R	Constante real dos gases (escalar)
T	Temperatura (ou campo de temperatura)
U	Vetor de Velocidade, no R3, quando escrito nas equações de Navier-Stokes
t	tempo
ρ	Massa especifica
Q	Termo genérico para fonte de energia
U	energia interna do sistema, quando escrito em equações termodinâmicas
Q	calor trocado entre o sistema e arredores
W	trabalho realizado pelo sistema sobre seu entorno
Y	Probit (relacionado com a percentagem de morte na área afetada pelo acidente)
V	medida da intensidade do efeito físico causador dos danos, quando aplicado na equação de probit (sobre pressão, impulso, radiação térmica X tempo de exposição, ou concentração x tempo de exposição);
K_1, K_2	parâmetros para aplicação da equação de Probit, sendo específicos para cada tipo de dano e de substância.
C	concentração de material tóxico na nuvem, (ppm);
Ω_A	Taxa molar volumétrica de geração de A.
\bar{v}_i	Velocidade da espécie "I" em relação a um referencial fixo
\bar{v}^*	Velocidade media em relação a um referencial fixo
ρ	Massa especifica da espécie "I"
C	concentração a espécie "I"
X	Fração molar da espécie "I"
<i>u</i>	<i>velocidade do fluido, medida na direção do eixo "x"</i>
<i>v</i>	<i>velocidade do fluido, medida na direção do eixo "y"</i>
C_i	<i>Concentração da espécie química "i"</i>
D_{ij}	<i>Difusividade da espécie química "i" através da espécie química "j"</i>
$\frac{\partial}{\partial x}$	Derivada parcial em relação a variável "x"

$\frac{\partial}{\partial y}$	Derivada parcial em relação a variável "y"
W^*	Termo fonte, equivalente a taxa de geração das quantidade analisada nas equações diferenciais.
H	Entalpia do sistema avaliado
k	constante cinética da reação química
$C_p(T)$	Calor específico, à pressão constante, de um dado sistema
Ea	Energia de ativação de uma dada reação química
\bar{v}_i	Velocidade da espécie "i" em relação a um referencial fixo
\bar{v}^*	Velocidade media em relação a um referencial fixo
ρ_i	massa específica da espécie "i"
C_i	concentração a espécie "i"
X_i	Fração molar da espécie "i"

SUMÁRIO

AGRADECIMENTO	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SIMBOLOS	xi
SUMÁRIO.....	xiii
1 INTRODUÇÃO, METAS E OBJETIVOS.....	14
1.1 INTRODUÇÃO.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Objetivos Específicos	16
1.3 METODOLOGIA	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 RISCO E PERIGO	18
2.2 PROCESSO DE GESTÃO DE RISCOS.....	19
2.2.1 Identificação de Riscos	22
2.2.2 Análise de Riscos	23
2.2.3 Avaliação de Riscos	24
2.2.4 Esquemas de Análise e Avaliação:	24
2.2.5 Tratamento de Riscos.....	28
2.3 RISCO AMBIENTAL	29
3 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DE RISCO AMBIENTAL	32
3.1 ANÁLISE DOS CENARIOS	35
3.2 AVALIAÇÃO DE RISCO QUALITATIVA.....	38
3.2.1 Análise Preliminar de Risco	38
3.3 AVALIAÇÃO DE RISCO QUANTITATIVA.....	43
3.3.1 Análise de Frequência	43
3.3.2 Análise de Severidade.....	48

3.3.3	Análise de Vulnerabilidade	48
4	APRESENTAÇÃO DO “ <i>BOILING LIQUID EXPANDING VAPOR EXPLOSION</i> ”	59
4.1	TEORIA DA COMBUSTÃO	59
4.1.1	Princípios de Combustão.....	59
4.1.2	Desenvolvimento do Incêndio.....	62
4.1.3	Formação de Chama	63
4.1.4	Equações Fundamentais	65
4.2	EXPLOSÃO	66
4.3	BLEVE	68
4.3.1	Mecanismo do BLEVE.....	69
4.4	MODELAGEM MATEMÁTICA DA FÍSICA DA COMBUSTÃO	71
4.5	MODELAGEM DE SISTEMA REATIVO	74
4.5.1	Velocidades	74
4.5.2	Fluxo Mássico e Fluxo Molar	75
4.5.3	Difusão de Espécies: Lei de Fick.....	76
4.5.4	Equação da Continuidade em Sistemas Reativos.....	77
4.5.5	Estabelecimento da Função de Chama.....	80
5	DISCUSSÃO DAS HIPÓTESES EM MODELOS FÍSICOS PARA ANÁLISE DE SEVERIDADE	90
5.1	EQUAÇÕES DE ESTADO: IMPACTO DAS HIPÓTESES	90
5.1.1	Ausência de Influências Externas.....	90
5.1.2	Fluido Incompressível.....	91
5.1.3	Problemas com Temperatura	91
5.1.4	Hipóteses de Chama	93
5.2	BOLA DE FOGO: LIMITAÇÕES DE MODELAGEM	95
6	DISCUSSÃO DAS ANÁLISES DE RISCO AMBIENTAIS	97
7	CONCLUSÕES.....	102
8	REFERÊNCIAS	104
	GLOSSÁRIO	113

1 INTRODUÇÃO, METAS E OBJETIVOS

1.1 INTRODUÇÃO

O sistema de gestão do uso dos recursos naturais e do meio ambiente no Brasil encontra-se ancorado em um conjunto de regras e legislações. Destaca-se a Lei 6.938 de 1981 que estabeleceu a Política Nacional de Meio Ambiente e definiu o sistema Nacional de Meio Ambiente, no qual o Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA, se insere. Este Conselho, em sua Resolução de número 237 de 19 Dez 1997 regulamentou o artigo 10 da Lei 6938 estabelecendo critérios e procedimentos para o licenciamento de instalações, empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais, consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou daquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental.

Dentre as regras e exigências para concessão de licença (previa, de instalação ou de Operação), a Resolução CONAMA 237 de 1997 determina que seja realizado Estudos Ambientais, que podem ser desdobrados no Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental. Uma vez considerado necessário o Estudo de Impacto ambiental, o órgão ambiental pode solicitar que o mesmo contemple análises e avaliações dos riscos prováveis, quando da operação do empreendimento (instalação).

As análises e avaliações de risco podem compor o Estudo de Impacto Ambiental requeridos em Lei. Estas análises e avaliações fazem parte dos estudos do risco. Estes estudos são ciências complexas que usualmente abordam o “problema” decompondo o risco em variáveis indeoendentes, tais como frequência e severidade. Decompor o risco em componentes torna o processo de análise menos complexo, porém introduz desvios entre os cenários reais e àqueles modelados.

Quando aplica-se os estudos de risco aos cenários / eventos ambientais, estes usualmente buscam definir a extensão do dano às áreas circunvizinhas ao empreendimento. Desta forma, as ferramentas pertinentes as avaliações ambientais tendem para a vertente das análises risco quantitativas, que DEVERIAM ser capazes de gerar informação confiável sobre as severidades e vulnerabilidades de sistemas complexos.

Conforme será abordado nesta dissertação, estudar severidade e vulnerabilidade são atividades distintas. A severidade caracteriza-se por estudar os potenciais efeitos de um

risco / evento, enquanto que a vulnerabilidade avalia como um determinado cenário responderá a um risco / evento.

As legislações e Normas estudadas nesta dissertação apresentam como ponto comum o fato de modelarem as vulnerabilidades usando-se os modelos binários de probit. Estes modelos avaliam, simplistamente, as fronteiras da área hipoteticamente afetada por um dado risco / evento.

Enquanto os estudos de vulnerabilidade e severidade podem assemelhar-se, estes diferem tão mais quanto mais complexo for o risco / evento estudado. Este hiato é particularmente significativo para sistemas reativos, nos quais além dos fenômenos físicos ocorre reação química. Um representante de sistemas reativos é o BLEVE.

O BLEVE, ou “Boiling liquid Explosion Vapor Event”, é um dentre vários fenômenos fluidodinâmicos e pode ser formado durante o desenvolvimento de uma emergência que envolva tanques de combustíveis sendo aquecidos.

Enquanto que a vulnerabilidade a um BLEVE será estudada usando-se modelos de probit, as severidades demandam modelagens mais complexas. Conforme será visto nesta dissertação, as modelagens para a severidade de um BLEVE envolvem o entendimento dos princípios físicos que regem, os quais são representados matematicamente por um conjunto de equações diferenciais parciais, não-lineares, e muitas vezes sem solução analítica. Este conjunto de equações será discutido e estudado no capítulo 4 deste trabalho.

A complexidade matemática de um sistema de equações fundamentais provoca a ausência de solução analítica para vários cenários. Nestes cenários as previsões são feitas usando-se tabelas, modelos simplificados (pseudomodelos) ou equações fundamentais discretizadas (elementos ou volumes finitos). As discretizações dos modelos passam pelos vários métodos numéricos conhecidos, tais como elementos finitos. Diferentemente de uma solução analítica, a alocação dos métodos numéricos permite a engenheiros e pesquisadores algum nível de previsão sobre o comportamento de alguns sistemas interessados, porém ficando restritos aos modelos estudados. Em termos matemáticos, pode-se dizer que a solução obtida através dos métodos numéricos restringe-se as condições de contorno estabelecidas para o problema.

Particularmente para o BLEVE, a complexidade do problema é aumentada em decorrência da presença de um termo fonte (devido a reação química de combustão), não linear para temperatura, agravando a solução (modelagem) da equação de conservação de energia (temperatura). Neste sistema de equações (sistemas reativos), a equação de conservação de energia tem outro termo do lado direito, investigando o calor gerado por uma reação química. Este termo é, em geral, modelada de acordo com a equação de Arrhenius, e, portanto, não-linear para a temperatura.

Agrava-se a isto o fato de o BLEVE gerar bola de fogo. Esta bola de fogo expande-se sobre o domínio, alterando suas fronteiras ao longo do tempo. Esta fronteira confunde-se com a chama. A modelagem da chama insere no sistema um quarto princípio físico: a difusão de massas.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar a análise e a avaliação de riscos, especialmente riscos ambientais. Durante este estudo, o presente trabalho objetiva tratar o risco como uma variável dependente de três variáveis independentes: frequência, severidade e cenário. Com o intuito de ilustrar as diferenças entre avaliação de riscos ocupacionais e ambientais além de diferenciar a cálculo da severidade do da vulnerabilidade o BLEVE será usado como estudo de caso.

Ressalta-se que o presente trabalho é focado na aplicação de modelos dentro dos conceitos macros de gestão de risco, não se preocupando em efetivamente simular um BLEVE (até por não tratar-se de uma dissertação de CFD – *Computacional Fluid Dynamics*)

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

[1.] Apresentar e discutir os conceitos de risco

[2.] Apresentar e discutir os princípios de gestão de Risco, aplicados à segurança ocupacional e ambiental

[3.] Discutir a aplicação das ferramentas de análise e avaliação de risco ambiental;

[4.] Utilizar o fenômeno do BLEVE como estudo de caso, com o objetivo de comparar, criticar e contrastar os resultados esperados das análises de risco ambiental e ocupacional.

1.3 METODOLOGIA

Apresente dissertação foi desenvolvida adotando-se a seguinte metodologia:

[1.] Avaliar o processo de gestão de riscos e ferramentas de avaliação;

[2.] Tomando como pano de fundo as ferramentas de análise de risco, apresentar o método da APR, conforme definida pela MIL STD 882 (ESTADOS UNIDOS, 2003), e caracterizar o risco como a combinação das componentes frequência e severidade;

[3.] Apresentar, discutir e criticar a chamada “análise de riscos quantitativa” conforme apresentada pelos órgãos ambientais brasileiros;

[4.] Apresentar, discutir e criticar as equações de Probit como formas de determinação de vulnerabilidade. Contrastar esta (vulnerabilidade) com os mecanismos de avaliação de severidade;

[5.] Modelar o sistema de equações que representa um sistema reativo (BLEVE) e podem ser usadas para calcular as severidades deste evento;

[6.] Comparar e contrastar os modelos de Probit e àqueles gerados a partir das equações fundamentais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 RISCO E PERIGO

Antes de abordar o processo de gestão do risco, faz-se necessário definir a entidade “Risco”. Para tal, a primeira abordagem usada será a da ISO 31000:2009, documento que define Risco como sendo:

“Risco: efeito de incertezas sobre objetivos

NOTA 1 Um efeito é um desvio do esperado – positivo ou negativo.

NOTA 2 Objetivos podem ter diferentes aspectos (tais como finanças, saúde e segurança, metas ambientais) e podem ser aplicados à diferentes níveis (tais como estratégico, organizacional, projetos, produtos e processos).

NOTA 3 Risco é frequentemente caracterizado pela referência do evento potencial e consequências, ou combinação destes.

NOTA 4 Risco é frequentemente expressado em termos da combinação da consequência de um evento (incluindo mudanças em circunstâncias) e a frequência de ocorrência associada.

NOTA 5 Incerteza é o estado, mesmo parcial, de deficiência da informação relacionada ao entendimento ou conhecimento de um evento, suas consequências e probabilidades.”(TRADUZIDO DA ISO 31000:2009),

Filosoficamente, entende-se que, para um mesmo perigo, o risco decresce conforme se implementam medidas de segurança. Uma “equação” para esta análise filosófica seria como se segue:

$$\text{Risco} = \frac{\text{Perigo}}{\text{Medidas de segurança}}$$

Observa-se que a operação acima é IMPOSSÍVEL de ser efetuada. O Perigo por ser uma característica da substância, não é mensurável e comporta-se de forma binária: existe ou não. Ou a substância É PERIGOSA ou NÃO É PERIGOSA. Aliado a esta fato, percebe-se que medir e avaliar, numericamente, as salvaguardas é uma tarefa praticamente impossível.

Desta análise, entende-se que o risco é a “entidade” criada quando se opta por interagir com um determinado perigo. Desta forma, o risco é a entidade que pode ser Administrada ou gerenciada. Esta gestão de riscos passa por uma análise deste, bem como pelo estabelecimento de critérios de priorização. Esta priorização dos riscos passa pelo, muitas vezes, substabelecimento de um “ranking” de prioridades.

Respeitando-se a complexidade do risco, o entendimento deste (risco) passa pela sua decomposição em entidades componentes menos complexas. Desta forma, o risco pode ser **representado** pela equação abaixo:

Equação 2.1

$$Risco = f(\text{frequencia}, \text{Severidade}, \text{Cenario})$$

Onde o componente cenário encontra-se contemplado no estabelecimento (ou adaptação) das categorias de frequência e Severidade ao evento avaliado. Este entendimento vai de encontro com a definição de “risco” dada pela OHSAS 18001:2007, onde o “risco” é diretamente relacionado com as suas variáveis fundamentais (frequência/probabilidade e severidade/consequência):

“Risco

Combinação da probabilidade de uma ocorrência de um evento perigoso exposição de uma lesão ou doença que pode ser causado ou exposto”
(TRADUZIDO DA OHSAS 18.001:2007)

Assim sendo, pode-se entender que o risco é a entidade a ser administrada, uma vez que decorre da interação humana com o perigo, sendo este (o perigo) binário: existe ou não. Assim estabelece-se o conceito de gestão de risco.

Este entendimento foi o conceito fundamental aplicado pelos EUA ao criar em 1972 a norma MIL STD 882 (ESTADOS UNIDOS, 2003), que trata de avaliar de riscos aplicando-se matrizes de avaliação multicritério. Esta análise será explorada em detalhes na seção 3.2.1 desta dissertação.

2.2 PROCESSO DE GESTÃO DE RISCOS

A gestão de risco pode ser definido como o conjunto de cultura, processos e estruturas que são orientadas para a realização de oportunidades potenciais, enquanto o manejo dos efeitos adversos. (AUSTRALIA, NZS 4360:2004). A gestão de riscos é um processo complexo que pode ser definido como uma aplicação sistemática de políticas de gestão, procedimentos e práticas

A CETESB define, no manual P4.261, gestão de risco como sendo:

“Gerenciamento de riscos

Processo de controle de riscos compreendendo a formulação e a implantação de medidas e procedimentos técnicos e administrativos que têm por objetivo prevenir, reduzir e controlar os riscos, bem como manter uma instalação operando dentro de padrões de segurança considerados toleráveis ao longo de sua vida útil.”

(CETESB, P4.261)

A gestão de riscos é um processo que, conforme apresentado na Norma AS NZS 4360:2004, engloba várias fases, etapas e tarefas, tais como:

- A comunicação,
- Identificação,
- Análise, avaliação,
- Tratamento,
- Acompanhamento, e
- Revisão de riscos.

A Figura 2-1 adaptada do manual de gestão de riscos NZS 4360:2004 (AUSTRALIA, 2004) apresenta um dos vários diagramas de blocos para o processo de gestão de risco, indicando cada etapa do processo global, bem como a sequência apropriada em que deve ser realizada.

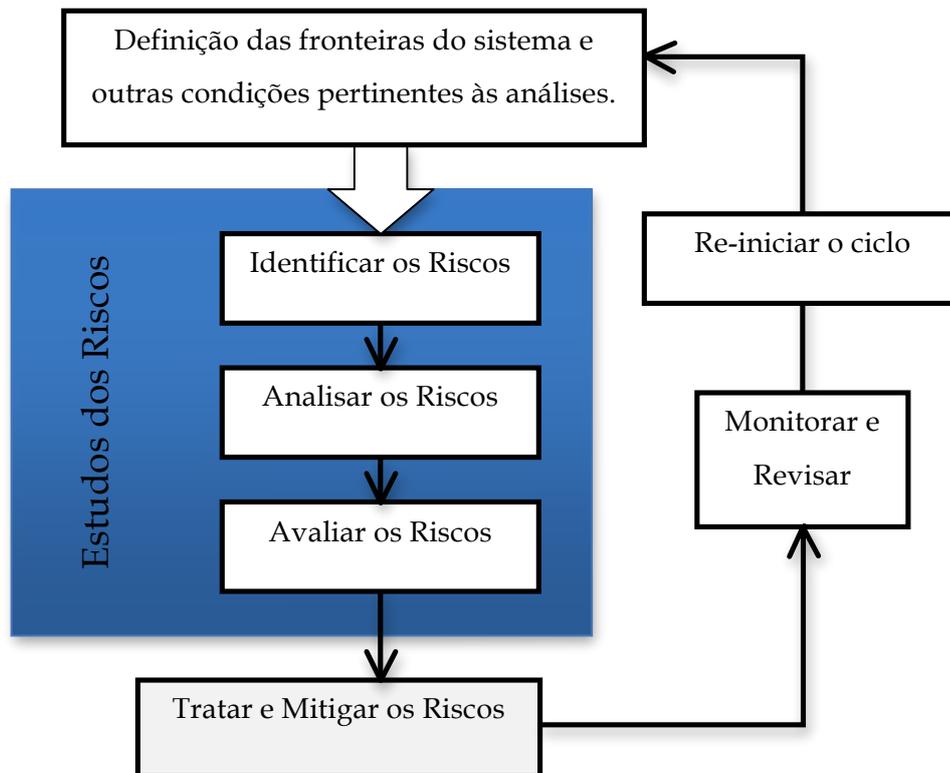


Figura 2-1 Processo de Gestão de Riscos, baseado na NZS 4360:2004
Fonte: Adaptada da NZS 4360:2004 (AUSTRALIA, 2004)

Comparando o fluxograma da Figura 2-1, que apresenta o processo de gestão de riscos como apresentado pela norma da Austrália e Nova Zelândia NZS 4360:2004 (AUSTRALIA, 2004) com o que se encontra apresentado na norma ISO 31000:2009 (Figura 2-2), percebe-se que o processo pode apresentar pequenas variações, mas mantém-se fiel em seus princípios.

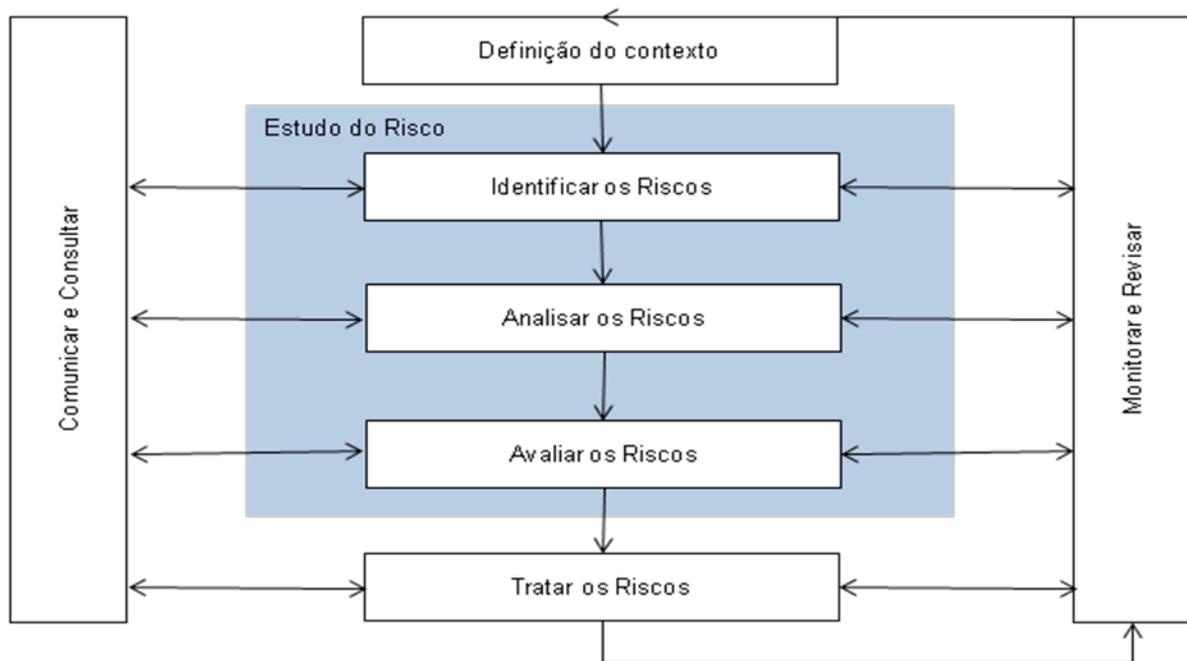


Figura 2-2 Processo de Gestão de Riscos baseado na ISO 31000:2009

Fonte: adaptado da ISO 31000:2009,

A gestão de riscos é um processo interativo, onde o risco é estudado ciclicamente (conforme indicado pela seta ligando "tratar o risco" e "acompanhamento e revisão" na Figura 2-1), reduzindo-o a cada ciclo.

2.2.1 Identificação de Riscos

A **Identificação de risco** é a etapa do processo de gestão do risco na qual os potenciais riscos são elencados. Estes riscos são extrapolados a partir das análises de cenários e reconhecimento de potenciais fontes geradoras (máquinas, equipamentos, processos industriais, combustíveis, substâncias químicas,...)

2.2.2 Análise de Riscos

A **análise de risco** é a etapa do processo de gestão de riscos que subsidia a etapa seguinte: Avaliação. É na análise de riscos que os riscos identificados são discutidos, criticados e entendidos. Esta etapa caracteriza-se por um processo sistemático de discussões e busca de informações para compreender a natureza do risco e deduzir o seu nível. Analisar um risco é discutir todas as possibilidades de ocorrência do acidente, na tentativa de se evitar que ele aconteça.

A CETESB em seu manual P4.261 e FEPAM (2001), em seu manual, definem análise de Risco, respectivamente:

“Análise de riscos

Estudo quantitativo de riscos numa instalação industrial, baseado em técnicas de identificação de perigos, estimativa de frequências e consequências, análise de vulnerabilidade e na estimativa do risco”
CETESB, P4.261

“Análise de Risco

Constitui-se em um conjunto de métodos e técnicas que aplicados a uma atividade proposta ou existente identificam e avaliam qualitativa e quantitativamente os riscos que essa atividade representa para a população vizinha, ao meio ambiente e à própria empresa. Os principais resultados de uma análise de riscos são a identificação de cenários de acidentes, suas frequências esperadas de ocorrência e a magnitude das possíveis consequências.” **Manual de PGR da FEPAM 2001**

Esta análise (de riscos) parte da premissa de que os sistemas sejam decompostos em subsistema menores e de entendimento facilitado, orientando para uma análise mais objetiva e imediata dos riscos decorrentes de um subsistema estar apresentando falhas e comprometendo o sistema principal, caminhando gradativamente para a consumação do acidente.

Muito frequentemente, a etapa de análise de risco visa selecionar dentre todos os riscos identificados àqueles mais significantes (com maior relevância para o cenário em questão), “encaminhando” estes à etapa de avaliação, otimizando os recursos e reduzindo o tempo global das análises.

2.2.3 Avaliação de Riscos

Por sua vez, a **Avaliação de riscos** é a etapa do processo destinada a comparar os diversos risco entre si, estabelecer prioridades, níveis de risco e orientar a alocação de recursos para as medidas mitigadoras mais relevantes. Faz-se importante ressaltar que, na maioria das ferramentas de avaliação o risco é avaliado seguindo-se algum critério pré-determinado e inerente àquela ferramenta, o que possibilita comparar os riscos avaliados entre si e contrastá-los contra os níveis de aceitabilidade (também pré-estabelecidos) para o risco. Um nível de aceitabilidade elevado indica que menos riscos (dentre os avaliados) deverão ser mitigados.

A CETESB no manual P4.216 define avaliação de risco como sendo:

“Avaliação de riscos

Processo pelo qual os resultados da análise de riscos são utilizados para a tomada de decisão, através de critérios comparativos de riscos, para definição da estratégia de gerenciamento dos riscos e aprovação do licenciamento ambiental de um empreendimento.” CETESB, P4.261

A etapa de avaliação busca estabelecer a hierarquia entre diversos riscos, possibilitando a ordenação destes, do mais grave para o de menor gravidade. Nas avaliações que requeiram mais detalhes, ou em sistemas que disponham de mais dados, os riscos devem ser avaliados através de suas variáveis fundamentais: consequências (severidades) e as possibilidades (probabilidade) de ocorrência

A avaliação da severidade pode ser realizada através de procedimentos indutivos, dedutivos ou matemáticos, enquanto que as análises da frequência pode ser avaliada com estudos estatísticos, chamados genericamente de ANÁLISES PROBABILÍSTICAS DE SEGURANÇA, donde se destaca a ferramenta da análise por árvore de falhas. Ressalta-se que as análises de frequência requerem o uso de series históricas e que a precisão dos resultados depende diretamente desta base de dados.

2.2.4 Esquemas de Análise e Avaliação:

No processo de gestão dos riscos uma fase importante é a avaliação de risco, que é feito por meio da utilização de ferramentas adequadas ao cenário em questão. Frequentemente, a fase da análise e avaliação acaba sendo tratadas pela mesma ferramenta, perfazendo a

análise e avaliação dos riscos em uma única etapa (procedimento).

Dentre as bases de análise e avaliação de risco existentes na literatura, destaca-se o livro de Willie Hammer (HAMMER, 1972) que apesar de ter sido publicado na década de 1970 ainda é considerado uma importante referência para estudos atuais, uma vez que suas ideias ainda são citadas e referenciadas em diversos trabalhos recentes, bem como em manuais de avaliação de risco. Isto se deve ao fato de Hammer ter desenvolvido os conceitos de análise de risco que vieram a servir de base para a elaboração das ferramentas de análise e avaliação de risco disponíveis atualmente na literatura.

HAMMER (1972) apresenta vários conceitos de ferramentas de análise de risco, os quais podem ser organizados em duas categorias macro:

- i. Análise de risco em árvores
- ii. Análise de risco em planilhas

Os esquemas de **análise de risco em árvores** focam-se na determinação da cadeia de eventos, bem como em trabalhar/determinar a frequência de ocorrência (probabilidade) ara um risco. A TNO, em seu "Red Book" (CPR 12E, 1997), apresenta a técnica de análise de árvore de falhas que é um exemplo válido da técnica da "análise de árvores". Árvores de falha podem aumentar seu grau de complexidade através de uma abordagem estatística (média e desvio padrão para cada probabilidade utilizada nos cálculos), como mostram os trabalhos de IMURA (1994), HORI (1996) e KALLELA (2006).

O outro esquema a ser considerado é o sob a forma de **planilha**. Dentre os esquemas de planilhas destacam-se áqueles utilizados para a identificação preliminar dos riscos (ESTADOS UNIDOS, MIL-STD-882, 2001). Outras ferramantes de análise de riscos por planilha prestam-se a estabelecer a compreensão acerca do risco e determinar a hierarquia entre vários diferentes riscos permitindo a implementação de um conjunto mais adequado de ações mitigadoras.

Alguns dos sistemas de avaliação de risco são ferramentas sob forma de planilhas, como o HazOp (CPR 12E, 1997) e FMEA (ESTADOS UNIDOS, MIL-STD-1629, 2000; HU, 2009), ou mesmo uma enorme gama de regimes de matrizes de risco (como exemplo, destaca-se a APR - Análise Preliminar de Risco (ESTADOS UNIDOS, MIL-STD-882, 2001).

A maioria dos esquemas de análise de risco aborda o problema usando o princípio da compartimentação, estudando os subsistemas e subcomponentes, em nome da simplicidade em cenários (sistemas) complexos. Esta "compartimentalização" é feita através do estabelecimento das fronteiras do cenário. Essas fronteiras podem definir subáreas para a análise, subsistema, subcomponente ou mesmo dividir o "alvo" da análise usando "nós" (pontos notáveis através do fluxograma do processo). O HazOp (CPR 12E, 1997; DUNJÓ et al, 2010) é um exemplo de técnica que utiliza o princípio de "nós" para "cortar" os fluxos de matéria e energia e analisar o risco envolvido em cada etapa da atividade (assumindo-se que nenhum risco elencado "ocorreu" no "nó" anterior).

Ao contrário do HazOp (CPR 12E, 1997; DUNJÓ et al, 2010), as técnicas de FMEA (ESTADOS UNIDOS, MIL-STD-1629, 2000) e o APR MIL STD 882 (ESTADOS UNIDOS, 2003) são exemplos de técnicas de análise e Avaliação de risco que abordam o problema de forma sistêmica, abordando-o como a soma de seus subsistemas e/ou componentes.

Independente da abordagem, todas as ferramentas de avaliação de risco disponíveis resultados de saída podem qualitativa ou quantitativa do risco. Na abordagem qualitativa, não há hierarquia entre os diversos riscos avaliados, sendo vagos com o risco é "pior" do que outro e, portanto, falham em estabelecer qual a prioridade de implementação entre as ações de mitigação elencadas.

Assim sendo, as ferramentas de análise e avaliação de riscos podem ser classificadas, simultaneamente, em duas categorias distintas: Qualitativa ou quantitativa e planilha ou árvore. A Tabela 2.1 resume as possibilidades

Tabela 2.1 Classificação das ferramentas de análise de risco

	Análise sob forma de PLANILHA	Análise sob forma de ÁRVORE
Análise QUALITATIVA	HazOp	Árvore de Falhas
Análise QUANTITATIVA	APP	Árvore de Eventos

A decisão a cerca da ferramenta, independente desta seguir uma abordagem qualitativa ou quantitativa; esta dependerá da disponibilidade de dados anteriores, bem como, pessoal qualificado para realizar a análise. No entanto, em qualquer caso, uma análise quantitativa

deve ser preferida em vez de qualquer qualitativa, pelos motivos ora apresentados (de hierarquia entre os riscos).

Em resumo, as ferramentas de análise e avaliação de risco podem, em geral, ser selecionada combinando os pontos fortes e fracos de cada regime com o cenário a ser analisado.

- a) **HazOp**. Este esquema é muito apropriado quando existe qualquer processo de fluxo para aplicarem-se os “nós”. Sabe-se que um diagrama de caixas pode representar cada fase de cada tarefa, e desta forma, pode ser usado como um "fluxograma" para efeitos de aplicação do HazOp, assumindo-se que os níveis de risco justifiquem esta abordagem
- b) **FMEA**. Este esquema é focado em analisar o modo de falha de um sistema. Portanto, é mais adequado para máquinas ou equipamentos.
- c) **ANÁLISES EM ARVORE**. Todas as ferramentas de avaliação desta categoria prestam-se para definir uma cadeia de eventos, ignorando as conseqüências deste (evento). Esta análise por ser realizada qualitativamente (estabelecimento de nexo causal) ou quantitativamente. Nas abordagens quantitativas busca-se determinar um valor para a frequências (probabilidade) de ocorrência de um evento. Ferramentas de análise de risco que se enquadrem nesta categoria ignoram o componente “severidade” do risco.
- d) **ESQUEMAS MATRICIAIS**. A forma como esses sistemas de abordagem dos riscos torná-los o mais flexível de todos eles. Estas ferramentas tratam as componentes do risco (frequência e severidade) independentemente, combinando-as para determinar o RAC (“*Risk Assessment Code*”). Destaca-se a técnica da APR conforme apresentada na MIL STD 882 (ESTADOS UNIDOS, 2003) como exemplo de esquema matricial.

2.2.5 Tratamento de Riscos

O **tratamento de riscos** decorre dos resultados das avaliações, sendo traçado planos de ação para mitigar os riscos, seguindo-se para tal as prioridades definidas pelos graus de riscos para os diversos eventos elencados e avaliados. Este (o tratamento de riscos) é o processo de selecionar e implementar medidas para modificar um risco. O elemento principal do tratamento de riscos é o controle e/ou diminuição dos riscos, mas engloba, num contexto mais vasto, evitar a consumação dos riscos, a transferência e o financiamento entre outros.

No mínimo, qualquer sistema de tratamento de riscos deve:

- i. • Proporcionar um funcionamento eficaz e eficiente da organização
- ii. • Garantir controles internos eficazes
- iii. • Cumprir com Leis e regulamentações

A partir deste momento o processo de gestão de riscos retorna a etapa inicial do processo, finalizando o ciclo em tela e reiniciando o processo. Este método cíclico segue os preceitos do PDCA (*Plan, Do, Check, Act*) da norma de qualidade ISO 9.000 e derivadas

A OHSAS 18001:2007 determina que o risco possa ser tratado e controlado conforme cinco princípios a seguir transcritos:

“Quando determinar supervisões, ou considerar mudanças para que existam estas supervisões, será dada consideração ao reduzir os riscos de acordo com as seguintes hierarquia:

- . a) *Eliminação;*
- . b) *Substituição;*
- . c) *Controles de engenharia;*
- . d) *Alertas/avisos e/ou supervisões administrativas;*
- . e) *“Equipamento de proteção pessoal.”*

(OHSAS 18.001:2007)

Assim devem ser definidas prioridades nas ações de controle em termos do seu potencial para benefício da organização. A eficácia do controle interno mede-se pelo grau de eliminação ou redução do risco através das medidas propostas. A eficácia em termos de custos dos controles internos está relacionada com os custos da sua implementação quando comparados com os benefícios esperados pela redução dos riscos.

2.3 RISCO AMBIENTAL

Dentro da macro-ciência que é a gestão de risco, existe o segmento focado em analisar e avaliar os riscos ao meio ambiente. À este risco dá-se o nome genérico de “risco ambiental”.

No Brasil o arcabouço das análises de riscos ambientais encontram-se nas legislações ambientais e, especificamente, nos processos de licenciamento de instalações e/ou empreendimentos. No cenário da segurança ambiental, além do conceito de risco, o entendimento correto do binômio aspecto-impacto. Isto se deve ao inter-relacionamento entre risco e impacto. Dentro do contexto da legislação ambiental brasileira, entende-se por impacto ambiental:

“Impacto Ambiental é qualquer alteração das propriedades físicas, químicas, biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que afetem diretamente ou indiretamente” Lei 6938 (BRASIL, 1981).

Para que haja impacto ambiental faz-se necessário que haja aspecto ambiental associado, gerando assim o binômio “aspecto-impacto”. O aspecto ambiental está intimamente ligado aos riscos do empreendimento, uma vez que este (aspecto ambiental) corresponde ao elemento das atividades ou produtos ou serviços de uma organização que pode interagir com o meio ambiente. A ISO 14.001 define ainda que aspecto ambiental da seguinte forma:

“Um aspecto ambiental significativo é aquele que tem ou pode ter um impacto ambiental significativo.” (ISO 14.001)

Para controlar os aspectos e impactos ambientais provenientes das diversas atividades econômicas, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) elaborou, amparado na Lei 6.938 de 1981 (BRASIL, 1981), a Resolução CONAMA número 237 de 19 Dez 1997

estabelece critérios (entre outros) para o licenciamento ambiental a que se refere o artigo 10 da Lei 6938 (BRASIL, 1981).

Como escopo, a Resolução CONAMA 237 de 1997 dispõe sobre o licenciamento ambiental, define termos e publica a listagem de atividades sujeitas ao licenciamento ambiental; aos Estudos Ambientais, ao Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e a elaboração de um Relatório de Impacto Ambiental (RIMA).

Dentre as definições publicadas pela Resolução CONAMA 237/97 publica em seu artigo 1º destacam-se:

*“**Licenciamento Ambiental:** procedimento administrativo pelo qual o órgão ambiental competente licencia a localização, instalação, ampliação e a operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais, consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou daquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental, considerando as disposições legais e regulamentares e as normas técnicas aplicáveis ao caso.”*

(Resolução Conama 237/97, Artigo 1º, Inciso I)

*“**Licença Ambiental:** ato administrativo pelo qual o órgão ambiental competente, estabelece as condições, restrições e medidas de controle ambiental que deverão ser obedecidas pelo empreendedor, pessoa física ou jurídica, para localizar, instalar, ampliar e operar empreendimentos ou atividades utilizadoras dos recursos ambientais consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou aquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental.”*

(Resolução Conama 237/97, Artigo 1º, Inciso II)

*“**Estudos Ambientais:** são todos e quaisquer estudos relativos aos aspectos ambientais relacionados à localização, instalação, operação e ampliação de uma atividade ou empreendimento, apresentado como subsídio para a análise da licença requerida, tais como: relatório ambiental, plano e projeto de controle ambiental, relatório ambiental preliminar, diagnóstico ambiental, plano de manejo, plano de recuperação de área degradada e análise preliminar de risco.”*

(Resolução Conama 237/97, Artigo 1º, Inciso III)

A correlação deste preâmbulo legal com o risco ambiental deve-se ao simples fato de que o “risco” é a “entidade” a ser gerenciada para que haja efetivo controle sobre os aspectos ambientais e consequente prevenção do impacto ambiental.

Especificando este conceito mais amplo e mantendo o foco na execução do processo de licenciamento, a CETESB definiu **Estudo de Impacto Ambiental** como se segue:

“Estudo de impacto ambiental (EIA). Processo de realização de estudos preditivos sobre um empreendimento, analisando e avaliando os resultados. O EIA é composto de duas partes: uma fase de previsão, em que se procura prever os efeitos de impactos esperados antes que ocorra o empreendimento e outra em que se procura medir, interpretar e minimizar os efeitos ambientais durante a construção e após a finalização do empreendimento. O EIA conduz a uma estimativa do impacto ambiental.”(CETESB, P4.261)

Durante a fase do Estudo de Impacto ambiental, o órgão ambiental pode solicitar que seja realizado, como parte do processo de licenciamento, as **análises e avaliações dos riscos** prováveis, quando da operação do empreendimento (instalação).

3 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DE RISCO AMBIENTAL

Analisar e avaliar um risco ambiental difere em escopo de analisar e avaliar um risco ocupacional ou mesmo um risco de falha de algum equipamento. Esta diferença começa no fato de a análise e avaliação de riscos ambientais serem requisitos legais para as atividades de empreendimentos potencialmente poluidores, nos moldes estabelecidos pela resolução Conama 237/97 de licenciamento ambiental e a possibilidade de que as análises de risco façam parte do estudo de impactos ambientais.

O processo de analisar um risco ambiental inicia-se por acoplar o cenário ambiental a fonte geradora do risco. Esta correlação passa por definir quais riscos podem ser simplesmente ignorados e quais precisam ser avaliados, e por quais ferramentas de avaliação.

Cada órgão ambiental brasileiro estabeleceu normas e procedimentos para esta análise (ou apropria-se de normas de outros órgãos). A FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE ROESSLER (FEPAM, 2001), por exemplo, estabeleceu procedimento de análise dos riscos como parte do processo de licenciamento das instalações. Os procedimentos da análise classificam o risco do empreendimento à ser licenciado em quatro categorias. Para cada categoria de risco existem diferentes mecanismos e procedimentos para a avaliação dos risco do empreendimento as ser licenciado. Ressalta-se que a categoria de risco 01 isenta o empreendimento da avaliação destes (riscos).

Os procedimentos de análise de riscos pela FEPAM (FEPAM, 2001) ocorre estabelecendo uma chamada “classificação da categoria de risco”, que é efetuada observando-se o valor do que a Norma FEPAM denomina de “Índice de Risco” (IR) (Equação 3.1).

Enquanto o Índice de Risco é determinado ponderando-se o potencial de dano (fator de Perigo) contra as distâncias consideradas (fator de Distância), a categoria de risco é determinada aplicando-se a correlação da Tabela 3.1.

Equação 3.1

$$IR = \frac{FP}{FD} = \frac{\text{Fator_de_Perigo}}{\text{Fator_de_Distancia}}$$

Onde: IR Índice de Risco (Equação 3.1)
 FP Fator de Perigo (Equação 3.2)
 FD Fator de Distância (Equação 3.3)

Tabela 3.1 Classificação de Instalações – Modelo FEPAM

Índice de Risco (IR)	Categoria de Risco
$IR \leq 1$	1
$1 < IR \leq 2$	2
$2 < IR \leq 4$	3
$4 < IR$	4

Fonte: FEPAM

O **Fator de Perigo** (Equação 3.2) é calculado dividindo-se a Massa Liberada Acidentalmente (MLA) pela Massa da referência (MR); representando assim uma medida da intensidade da fonte de risco. Quanto maior for a quantidade de material que puder ser liberada acidentalmente, maior será o perigo e, portanto maior será o risco.

Equação 3.2

$$FP = \text{Fator_de_Perigo} = \frac{MLA}{MR} = \frac{\text{Massa_Liberada_Acidentalmente}}{\text{Massa_da_Referencia}}$$

Enquanto que o **Fator de Distância** (Equação 3.3) é calculado dividindo-se por uma distância padrão (50 metros) a menor distância entre o ponto de liberação e o ponto de interesse onde estão localizados os recursos vulneráveis. Quanto maior for a distância entre a fonte de perigo e o ponto onde se localizam os recursos vulneráveis, menor deverão ser os danos e, portanto os riscos.

Equação 3.3

$$FD = \text{Fator_de_Distancia} = \frac{\text{Distancia_Considerada}(m)}{50(m)}$$

De posse dos resultados das análises de risco, o responsável pelo processo de licenciamento junto à FEPAM de um empreendimento pode determinar quais procedimentos de avaliação destes (riscos) são pertinentes, uma vez que a FEPAM (FEPAM 2001) estabeleceu em seus documentos que:

“Empreendimentos na categoria de risco 2: estudo de análise de risco deverá conter pelo menos uma **Análise Preliminar de Riscos (APR)**, com indicação todos os sistemas de proteção e procedimentos de segurança existentes nas instalações analisadas; o relatório deverá destacar claramente a relação de recomendações e de medidas mitigadoras identificadas pela APR.” (FEPAM, 2001)

“Empreendimentos na categoria de risco 3: o relatório da análise de riscos deverá conter, além dos tópicos indicados para os empreendimentos de categoria de risco 2, também uma **Análise de Vulnerabilidade** para um conjunto de cenários de acidente considerados razoavelmente prováveis e representativos dos principais cenários de acidente das instalações em questão. Os resultados da Análise de Vulnerabilidade deverão ser apresentados sob a forma de mapas da região com destaque para o layout das instalações analisadas, sobre os quais serão traçadas as curvas demarcatórias das áreas vulneráveis para cada tipo de acidente, abrangendo os seguintes níveis de efeitos físicos:

- para nuvens tóxicas: concentração igual ao IDLH da substância (quando a substância não tiver um valor próprio de IDLH, deverá ser usado um valor equivalente calculado de acordo com o procedimento apresentado no Apêndice 1);
- para nuvens de substâncias inflamáveis: concentração igual ao limite inferior de inflamabilidade da substância;
- para incêndios em poça ou tocha (jato de fogo), deverá ser indicada a curva representativa do nível de fluxo térmico igual a 5 kW/m²;
- para explosões de qualquer natureza (de nuvens de vapor, físicas, confinadas ou não e de substâncias explosivas) deverão ser indicadas as curvas representativas dos seguintes níveis de sobre pressão: 13 kPa (1% probabilidade de ruptura de tímpanos) e 7 kPa (danos estruturais em residências).” (FEPAM, 2001)

Empreendimentos na categoria de risco 4 : deverá ser realizada uma **Análise Quantitativa de Risco completa.**” (FEPAM, 2001)

Em resumo, a norma da FEPAM estabelece categorias de riscos como etapa de análise de riscos do empreendimentos em questão. Desta categoria de risco derivará o método de avaliação de riscos. O método mais “básico” determinado pela FEPAM para avaliação de riscos é a APR (análise preliminar de Riscos), a ser utilizada como parte do processo de licenciamento de empreendimentos classificados sob a categoria de risco 2 e 3. A FEPAM apresenta ainda as categorias de frequência e severidade e a matriz de risco a ser usadas.

Contudo, quando aborda outras ferramentas de avaliação de riscos, a norma FEPAM omite os modelos matemáticos a serem empregados na determinação da vulnerabilidade de sistemas. Os conceitos de vulnerabilidade encontram-se discutidos em detalhes na seção 3.3.3 desta Dissertação.

De forma semelhante à FEPAM, a CETESB também estabelece critério semelhante para a análise de risco e subsequente pertinência da avaliação deste (risco).

O procedimento determinado pela CETESB para a análise de risco encontra-se oficializado no manual P4.261, onde o determinante para o risco (e formas de modelá-lo) é a comparação entre uma distância segura (ds) e a distância à população fixa (dp). A Tabela 3.2 apresenta o método de avaliação a ser utilizado para o resultado de cada análise realizada.

Tabela 3.2 Critério da CETESB para exigência de Estudo Ambiental de Risco

Critério	Ação
$dp \leq ds$	Realização de EAR
$dp > ds$	Dispensa do EAR e realização de PGR, de acordo com os critérios estabelecidos pela CETESB, considerando o porte do empreendimento

O manual P4.261 da CETEAB determina ainda que o PGR pode ter escopos diferentes, variando conforme o empreendimento sob avaliação.

3.1 ANÁLISE DOS CENARIOS

Em ambas a análise e avaliação de riscos o entendimento do cenário é de fundamental importância. Para BAKER (1983), por exemplo, a análise de riscos envolve a construção de um cenário (ou série de cenários) de eventos envolvendo acidentes com materiais perigosos.

Da análise do cenário deriva todo o entendimento de quais riscos são (podem ser) relevantes ou significativos ou mesmo pertinentes à análise, ou mesmo a aceitabilidade dos riscos. O cenário determina inclusive a natureza dos riscos identificados para uma mesma fonte.

Tomando-se para modelo uma indústria (Figura 3-1) cuja operação cotidiana envolva fontes de risco (ruído, por exemplo). Todos os efeitos (riscos) gerados por esta fonte cujas

manifestações ocorram no interior da área da industrial são escopo das análises de risco ocupacional, enquanto que os efeitos extramuros são os de interesse para a gestão do risco ambiental. Contudo, a fonte permanece a mesma.

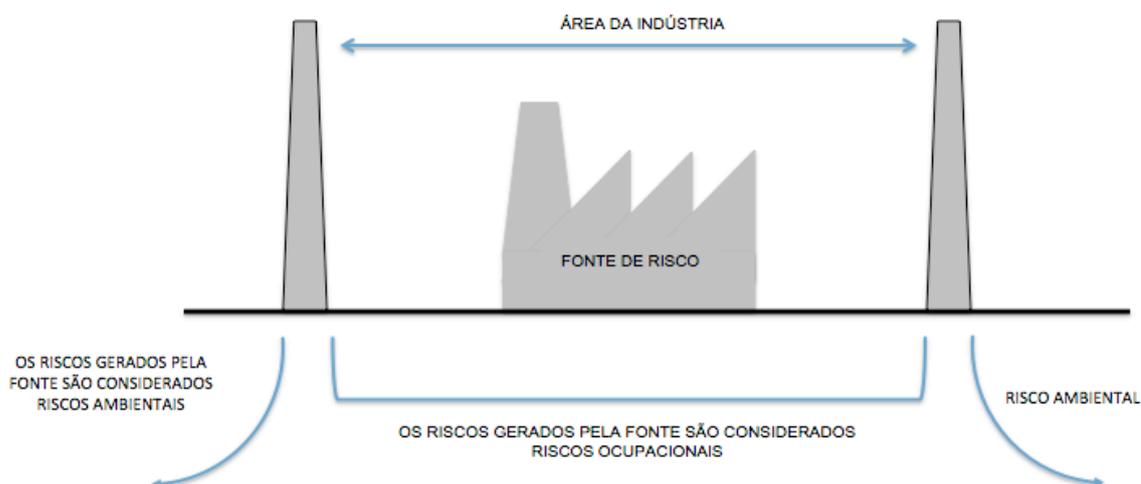


Figura 3-1 Risco Ocupacional vs Risco Ambiental

Analisando o cenário de forma macro, percebe-se que os riscos ambientais são, por definição, mais amplos do que os ocupacionais, para uma mesma fonte. A análise dos riscos no ambiente ocupacional limita-se às fronteiras da “geradora” (a indústria da Figura 3-1, por exemplo). No que tange aos riscos ambientais, os limites estendem-se até onde o analista entender ser razoável. Os riscos ocupacionais gerados por uma metalúrgica (por exemplo) serão os mesmos, independente desta ser instalada na Europa ou Rio de Janeiro, contudo, para o risco ambiental esta afirmativa é falsa. O risco ambiental estuda os efeitos de uma fonte de risco (no exemplo, a metalúrgica) sobre um receptor (cenário).

Geralmente a distância colocada entre a fonte geradora e o receptor (deste risco) representa fator preponderante para determinar se a análise e avaliação do risco ambiental é justificada.

Complementarmente, pode-se afirmar que analisar os riscos oriundos das diversas fontes de riscos existentes em uma dada instalação somente é justificada (sob o ponto de vista do risco ambiental) quando os impactos ambientais (nos moldes da Res CONAMA 237) derivados destes são significativos.

Observando um cenário hipotético onde um risco industrial tenha sob sua área de influência uma edificação comercial, um complexo residencial e uma área rural, conforme proposto no croqui da Figura 3-2, percebe-se que a mesma fonte de risco provoca uma diferente vulnerabilidade (resposta) para cada área adjacente à indústria.

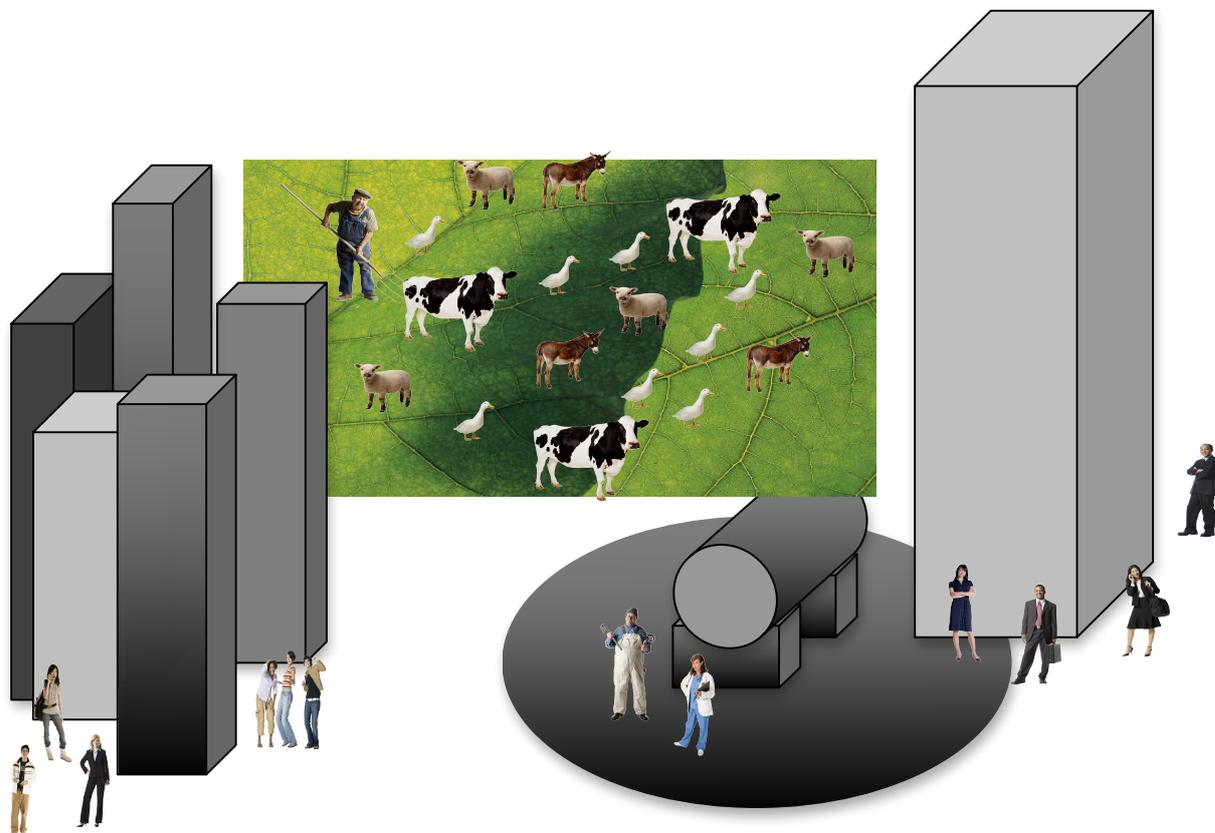


Figura 3-2 Esquema de cenário - Risco Ambiental

No caso hipotético da Figura 3-2, os efeitos de uma explosão mecânica seguida de bola de fogo (BLEVE) poderão ser sentidos em todos os cenários representados (assumindo-se que as quantidades de combustível sejam suficientemente significativas), contudo as vulnerabilidades serão diferentes em cada localidade.

O primeiro fator determinante para determinar as vulnerabilidades de um cenário para um dado evento (no caso da Figura 3-2, um BLEVE) é a distância para o epicentro do evento. Quanto maior a distância, menores os impactos dos efeitos do acidente, e consequentemente, menor a vulnerabilidade deste local perante este acidente.

Outro fator a ser observado no cenário para determinar a vulnerabilidade deste (cenário) perante um dado acidente é a possibilidade de haver vítimas no local. Quanto mais populoso ou ocupado for um local, maior a vulnerabilidade deste perante um evento (acidente).

Em última análise, o cenário interfere diretamente nos resultados das análises de risco e vulnerabilidades de um sistema.

3.2 AVALIAÇÃO DE RISCO QUALITATIVA

A avaliação de risco qualitativa aplica-se tipicamente de forma preliminar à outras ferramentas de análise e avaliação. Apesar de serem agrupadas como “qualitativas” algumas ferramentas são, na verdade, pseudo-quantitativas, pois geram um “RAC” (“*Risk Assessment Code*” – Código de Gradação do Risco) que possibilita comparar e contrastar diversos riscos entre si, assumindo que todos tenham sido avaliados utilizando-se os mesmos critérios. O principal representante das ferramentas de avaliação de riscos qualitativas é a APR – Análise Preliminar de Riscos.

3.2.1 Análise Preliminar de Risco

A análise preliminar de riscos (APR) é uma ferramenta de análise de risco baseada numa metodologia multicritério, estruturada para identificar, analisar e avaliar (classificar), preliminarmente, os riscos existentes em instalações, processos, equipamentos ou sistemas existentes. No contexto da APR, um cenário de acidente é definido como sendo o conjunto formado pelo perigo identificado, suas causas e consequências prováveis.

A ferramenta da APR destina-se à avaliações de risco, e consequente priorização destes (riscos), através de análises multicritério. A correta aplicação da APR prevê a decomposição do risco em suas variáveis fundamentais (frequência, severidade e cenário):

$$\mathbf{Risco = f(frequência, severidade, cenário)}$$

Esta decomposição do risco possibilita analisar cada variável independentemente e ignorando interferências. Os resultados destas análises serão utilizados para atribuir ao

risco um o valor do risco (RAC – *Risk Assessment Code* (código de gradação do risco)). Este valor para o risco serve para comparar dois ou mais riscos entre si, possibilitando a tomada de decisão.

O estabelecimento do valor do Risco passa por análises multicritérios, as quais ponderam isoladamente a frequência de ocorrência do risco e as consequências caso este se materialize (severidade). O resultado destas ponderações é carregado para uma matriz de risco, que gera como resultado um “valor” para o risco (RAC – *Risk Assessment Code* (código de gradação do risco)). O terceiro componente do risco, o cenário da análise, é ponderado quando da elaboração dos critérios empregados na APR (matriz de risco, categorias de frequência e de severidade)

Estas matrizes de risco possibilitam relacionar a frequência e severidade associadas ao risco, usando-se de categorias predeterminadas (parametrização) para estas componentes do risco. Na Tabela 3.3 encontram-se as categorias de frequência (parametrização da frequência) sugeridas, adaptadas da MIL STD 882 (ESTADOS UNIDOS, 2003), enquanto que a Tabela 3.4 apresenta as categoria de severidade (parametrização das severidades), o que possibilita “converter” uma “causa para o risco” em um parâmetro de frequência e uma “consequência esperada da materialização do risco” em um parâmetro de severidade.

Ressalta-se que as tabelas de categorias de frequências e severidade podem (e devem) ser adaptadas conforme o cenário de aplicação, completando o entendimento de risco como função de frequência, severidade de cenário.

Tabela 3.3 Categorias de Frequência

CATEGORIA	DENOMINAÇÃO	DESCRIÇÃO	FAIXA DE FREQUENCIA
A	IMPROVAVEL	Extremamente improvável, podendo ser considerada que o evento não ocorrerá	frequência menor que 10^{-6}
B	REMOTA	Improvável, mas possível de ocorrer na vida útil do item/processo.	frequência entre 10^{-6} e 10^{-3}
C	OCASIONAL	Esperado de ocorrer durante a vida útil do item/processo.	frequência entre 10^{-3} e 10^{-2}
D	PROVÁVEL	Ocorrerá varias vezes durante a vida útil de um item/processo	frequência entre 10^{-2} e 10^{-1}
E	FREQUENTE	Provável de ocorrer diversas vezes durante a vida útil de um item / processo	frequência superior a 10^{-1}

Fonte: Traduzido e Adaptado da MIL STD 882 (ESTADOS UNIDOS, 2003)

Tabela 3.4 Categorias de Severidade

CATEGORIA	DENOMINAÇÃO	DESCRIÇÃO	FAIXA DE VALOR
I	CATASTRÓFICA	Podem provocar mortes, lesões graves com incapacitação permanente; ou Danos severos e irreparáveis ao meio ambiente que viole Lei ou regulamento	Superior a US\$ 1 Milhão
II	CRÍTICA	Pode provocar lesões graves com incapacitação parcial ou doença ocupacional que resulte em hospitalização de ao menos três pessoas; ou Danos irreparáveis ao meio ambiente que viole Lei ou regulamento	Entre US\$ 200 Mil e US\$ 1 Milhão
III	MARGINAL	Pode provocar lesões ou doença ocupacional que resulte em onde ou mais dias não-trabalhados; ou Danos mitigáveis ao meio ambiente sem violação de Lei ou regulamento, onde as atividades podem ser reestabelecidas	Entre US\$ 10 Mil e US\$ 200 Mil
IV	DESPREZÍVEL	Pode provocar lesões ou doença ocupacional que não resulte em prejuízo em dias de trabalho; ou Danos ambientais mínimos sem violação de Lei ou regulamento,	Entre US\$ 2 Mil e US\$ 10 Mil

Fonte: Traduzido e Adaptado da MIL STD 882 (ESTADOS UNIDOS, 2003)

Uma vez definidos os parâmetros de frequência e severidade, estes podem ser interpolados usando-se a matriz de risco (Tabela 3.5), obtendo-se um valor para o risco. O valor deste risco aplica-se a comparar e contrastar dois ou mais riscos entre si, estabelecendo-se relevâncias.

Tabela 3.5 Matriz de Risco (prioridades)

		FREQÜÊNCIA				
		A	B	C	D	E
SEVERIDADE	I	12	8	4	2	1
	II	15	10	6	5	3
	III	17	14	11	9	7
	IV	20	19	18	16	13

Fonte: Traduzido e Adaptado da MIL STD 882 (ESTADOS UNIDOS, 2003)

Tabela 3.6 Legenda da Matriz de Riscos

PRIORIDADE (RISCO)	CATEGORIA DE RISCO	Indicação na Matriz de Risco
1 – 5	Alto	VERMELHO
6 – 9	Serio	LARANJA
10 – 17	Médio	AMARELO
18 - 20	Baixo	VERDE

Fonte: Traduzido e Adaptado da MIL STD 882 (ESTADOS UNIDOS, 2003)

Em resumo, a APR é um método de avaliação de riscos por estabelecimento de prioridades. As prioridades são determinadas usando-se modelos matriciais multicritérios, as quais consistem em decompor o risco em suas componentes fundamentais e analisa-las separadamente. As componentes do risco são a extensão dos danos (severidades) e as frequências de ocorrências.

Ressalta-se que a aplicação correta desta ferramenta permite, ainda, orientar (ordenar) as ações mitigadoras a serem implementadas. Isto é feito através da priorização dos riscos,

seguido do relacionamento das causas e consequências que foram usadas para “gerar” o risco em questão.

3.3 AVALIAÇÃO DE RISCO QUANTITATIVA

Neste contexto, as análises de risco ambientais tendem a tratar as análises de severidade e/ou vulnerabilidade como se fossem análises quantitativas de risco (AQR). Este entendimento subverte o conceito clássico de risco apresentado por HAMMER (1972) (onde o Risco é resultante da combinação de suas duas componentes fundamentais: frequência de ocorrência e severidade do evento). As análises de severidade têm se confundido com análises de riscos em diversos documentos normativos.

De modo geral, os documentos normativos confundem as análises de risco quantitativas com análises de vulnerabilidade, ou mesmo com estabelecer áreas vulneráveis (como, por exemplo, apresentado no início da seção 2.3 onde o manual da foi analisado).

A definição de áreas vulneráveis pode ser realizada através da aplicação de modelos matemáticos, tabelas ou aproximações. Dentre os modelos matemáticos aplicados, destaca-se o modelo baseado no conjunto de equações de probit. A CETESB, entidade de referência para assuntos de avaliações ambientais no Brasil, cita os modelos do tipo dos de Probit como ferramenta para análise de vulnerabilidade no manual P4.216:

3.3.1 Análise de Frequência

Analisar a frequência de ocorrência de um risco é o exercício de estabelecer a sucessão de causas e efeitos para, numa segunda fase, quantificar a probabilidade de cada uma destas

Ao conjunto de técnicas que analisam a frequência de ocorrência de um risco dá-se o nome genérico de ANÁLISES PROBABILÍSTICAS DE SEGURANÇA, ou simplesmente APS. Dentre o conjunto das APS destacam-se as técnicas de ÁRVORE DE FALHA (CDP 12E, 2001; IMURA, 1994; HORI, 1996; KALLELA, 2006). Estas análises por árvore de falhas ou de eventos são técnicas que podem ser desenvolvidas segundo uma abordagem qualitativa ou quantitativa.

Na abordagem qualitativa o objetivo é “apenas” estruturar a sequência de eventos (causas e efeitos) através do relacionamento do conjunto de falhas que ocasionariam o evento indesejado (risco). Ao passo em que a abordagem qualitativa pode ser complementarmente detalhada, passando a tornar-se quantitativa. Este detalhamento ocorre pela introdução dos valores de probabilidade e frequência de ocorrência dos eventos raiz (aqueles que não podem ser decompostos em causas, sendo eles os causadores de si mesmos) e calculando-se a probabilidade de materialização do risco através de matemática booleana. Estes valores de probabilidade podem ser determinados usando-se um tratamento pontual ou estocástico. A modelagem de Monte Carlo pode ser aplicada quando se deseja retratar as árvores com tratamento estatístico (RAO et al, 2009).

Esta técnica pode ser empregada para qualquer modelo ou evento indesejado, particularmente para eventos complexos, desde que os resultados esperados relacionem-se com a possibilidade de ocorrência.

As técnicas de árvore de falhas são, geralmente, eficazes quando usadas complementando outras técnicas, ou mesmo em conjunto com estas (outras técnicas).

3.3.1.1 Metodologia

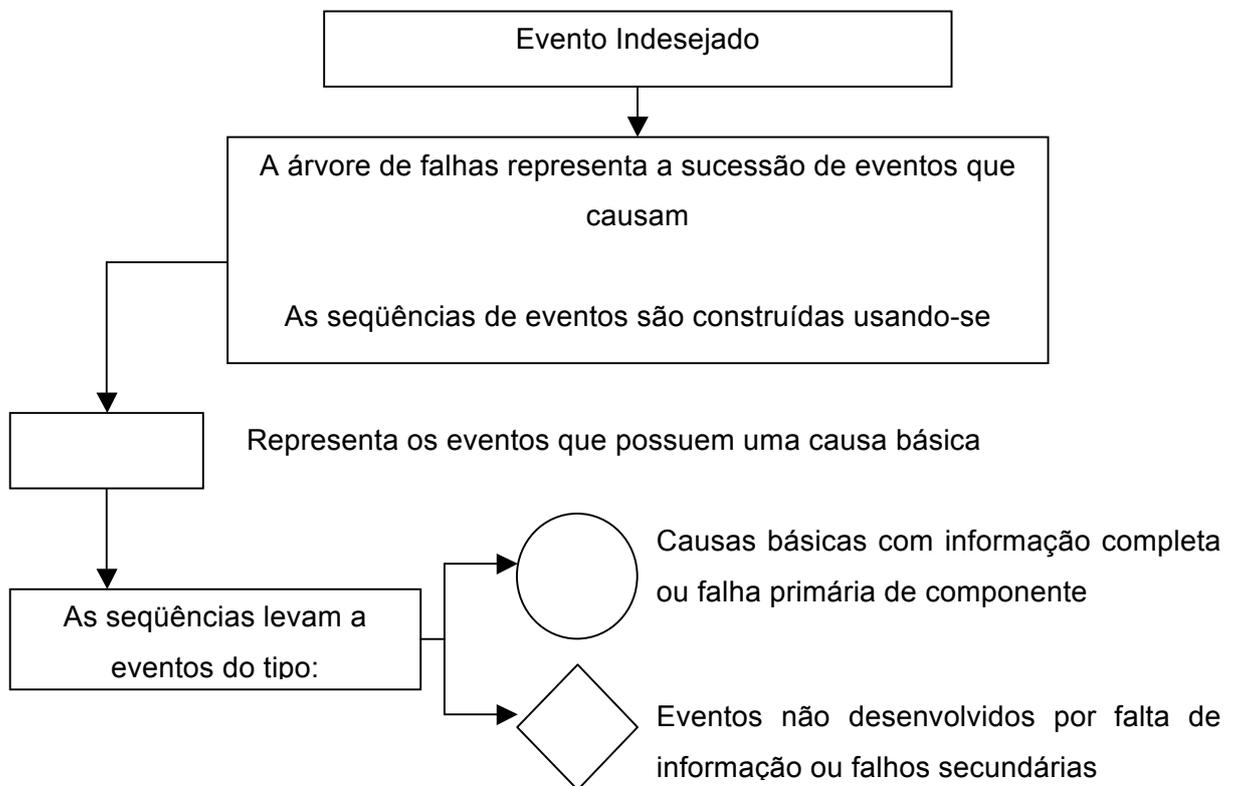
Geralmente as técnicas de análise probabilística de segurança que utilizam o procedimento de árvore seguem o seguinte método:

- a) Seleção do evento indesejado,
- b) Determinação dos fatores contribuintes,
- c) Diagramação lógica (construção da árvore)
- d) Desenvolvimento matemático das probabilidades (álgebra Booleana)
- e) Simplificação da árvore (conforme o caso)

3.3.1.2 Característica de Falha de Componentes:

- **Falha Primária:** Componente falha por envelhecimento ou desgaste. É necessário reparo do componente para o retorno á atividade
- **Falha Secundária:** Ação externa sobre o componente o leva a falhar (ambiente, manutenção, vibração...). É necessário reparo do componente para o retorno á atividade
- **Defeito de Comando:** O componente não atua devido á falha de outro(s) componente(s) anterior (es) ou por emissão de sinal inadequado.

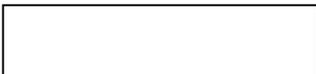
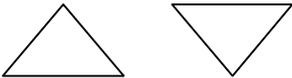
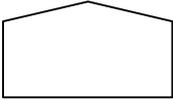
3.3.1.3 Estrutura da Árvore de Falhas:



3.3.1.4 Simbologia Empregada

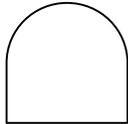
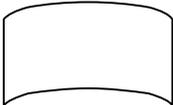
A simbologia empregada na construção das árvores de falha, conforme o método apresentado no “Red Book” (TNO) encontra-se resumida na Tabela 3.8 e Tabela 3.7:

Tabela 3.7 Listagem de Símbolos dos Eventos

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
	Evento interligado por uma comporta. Existem outros eventos de entrada responsáveis pela sua ocorrência
	Evento básico com dados de probabilidade e informações completa a respeito de sua caracterização ou falha
	Evento não desenvolvido devido a falta de informação ou falha secundária de componente
	Símbolos de Transferência
	Evento condicional <ul style="list-style-type: none">• Comporta E, a restrição deve ser satisfeita antes que o evento possa ocorrer,• Comporta OU, a restrição pode ser que o evento não ocorra na presença de ambos ou todos os eventos de entrada simultaneamente,• Comporta INIBIÇÃO, a restrição é variável.
	Evento que ocorre sempre, exceto caso provocar-se uma falha

FONTE: Traduzido e adaptado do “Red book” (TNO)

Tabela 3.8 Listagem de Símbolos dos conectivos lógicos

SÍMBOLO	NOME	RELAÇÃO CAUSAL
	E	Evento de saída ocorre somente se todos os eventos de entrada ocorrer, simultaneamente.
	OU	Evento de saída ocorre se pelo menos um dos eventos de entrada ocorrer, independentemente.

FONTE: Traduzido e adaptado do “Red book” (TNO)

3.3.1.5 Detalhes da Montagem da Arvore de Eventos:

Iniciar a análise de risco utilizando-se a ferramenta da árvore de eventos partindo-se de um evento gerador. Tomando-se este evento gerador como base, analisa-se cada parte do sistema sequencialmente, desenvolvendo-os. Quando o evento em estudo referir-se a duas ou mais condições diferentes, separa-las utilizando a porta lógica adequada (“E”, “OU”). A seguir, determina-se a natureza do evento como falha de estado de componente ou de sistema

- **Falha de Estado de Componente** caracteriza-se de um único componente. Colocar uma comporta “OU” sob este evento e analisar os tipos de falha primária ou secundária.
- **Falha de Estado de Sistema** é verificado através de causas sequenciais. Este tipo de falha requer uma porta “E”, “OU” ou nenhuma porta.

3.3.2 Análise de Severidade

O conceito de severidade está relacionado com as consequências possíveis decorrentes da materialização de um risco, o qual se desdobrou em um acidente.

Enquanto o conceito de consequência relaciona-se com a correlação de causa e efeito, a severidade relaciona-se diretamente com a intensidade dos efeitos.

A severidade, por não relacionar-se com uma cadeia de eventos cronológicos, pode ser tratada de maneira isolada no tempo e no espaço. Isto possibilita que a severidade seja modelada através de modelos físicos e matemáticos. Diferente da Vulnerabilidade, a severidade é modelada observando-se os efeitos potenciais das fontes de risco, independente dos cenários.

3.3.3 Análise de Vulnerabilidade

Diferente da análise de frequência e severidade (que analisam o risco), a análise de vulnerabilidade trabalha na interação risco – cenário.

Analisar uma vulnerabilidade é, basicamente, determinar como um ambiente responde a um dado risco. Nas análises de vulnerabilidade o foco passa do gerador do risco para o seu receptor, ou seja, passa-se a buscar determinar como um dado ambiente comportar-se-á perante um acidente envolvendo a fonte do risco (explosão, vazamento, extensão de contaminação).

Geralmente analisar a vulnerabilidade de um ambiente é determinar as prováveis extensões de danos caso um acidente ocorra. A CETESB, em seu manual de análise e avaliação de riscos (P4.261) define análise de vulnerabilidade como sendo:

*“Análise de vulnerabilidade. Estudo realizado por intermédio de modelos matemáticos para a previsão dos impactos danosos às pessoas, instalações e ao meio ambiente, baseado em limites de tolerância estabelecidos através do **parâmetro Probit** para os efeitos de sobre pressão advinda de explosões, radiações térmicas decorrentes de incêndios e efeitos tóxicos advindos da exposição a uma alta concentração de substâncias químicas por um curto período de tempo.” (CETESB, P4.261)*

Dentre os mecanismos existentes para se analisar a vulnerabilidade de um ambiente (cenário), a mais difundida é àquela em que se determina extensão de áreas atingidas ou áreas com uma dada concentração probabilística (“até “x” metros existe 99% de probabilidade de mortos”, por exemplo) a partir da fonte.

Matematicamente, as funções de Probit apresentam um modelo consistente para determinar estas áreas afetadas. A rigor, contudo, as funções de probit determinam somente as fronteiras destas áreas.

3.3.3.1 MODELO DE PROBIT

Para que seja possível quantificar as extensões de danos ambientais derivados de acidentes, sem que haja necessidade de resolver os sistemas de equações fundamentais aplicáveis, existem alguns modelos e aproximações que possibilitam aproximar estes resultados. Dentre estes modelos, destacam-se aqueles construídos a partir dos modelos probabilísticos de Probit, definido pela CETESB como sendo:

*“**Probit.** Parâmetro que serve para relacionar a intensidade de fenômenos como radiação térmica, sobre pressão e concentração tóxica com os danos que podem causar. O Probit (unidade de probabilidade) é uma variável randômica com média 5 e variância 1. O valor do Probit é relacionado a uma determinada porcentagem através de curvas ou tabelas.” (CETESB, P4.261)*

Dentro das teorias da probabilidade e estatística, a função probit é a função de distribuição cumulativa inversa (CDF do inglês “*Cumulative Distribution Function*”), ou função de quantidade associada com a distribuição normal padrão, que encontra aplicações na exploração de gráficos estatísticos e modelagem de regressão das variáveis de resposta especializada binário.

A função probit apresenta como resultados o “inverso” da função Normal, ou seja, enquanto a distribuição normal padrão (denotada como $N(0,1)$ e seu CDF como $\Phi(z)$) tem a função Φ monótona, a função de probit apresenta um valor de uma variável $N(0,1)$ aleatório, associado a probabilidade cumulativa especificado. Formalmente, a função probit é o inverso de $\Phi(z)$.

Matematicamente, escreve-se:

Equação 3.4

$$\Phi(\text{probit}(p)) = p \text{ e } \text{probit}(\Phi(z)) = z$$

A ideia de probit foi publicado em 1934 por Chesterlittner Bliss (1899-1979) que propôs transformar a porcentagem de mortos em um "unidade de probabilidade" (ou "probit").

Bliss também incluiu uma tabela para auxiliar outros pesquisadores para converter a porcentagens de mortos para a sua probit, o que poderia atuar contra o logaritmo da dose e, proporcionando a obtenção de uma linha reta. Esta abordagem é justificada se a variação de resposta pode ser racionalizada como uma distribuição log-normal de tolerância entre os sujeitos no teste, onde a tolerância de um determinado assunto é a dose suficiente apenas para a resposta de interesse.

A modelagem de probit parte do pressuposto que a variável resposta Y seja de natureza binária, ou seja, ele pode ter apenas dois resultados possíveis (0 ou 1; presença ou ausência de uma certa condição de sucesso; sim ou não em uma pesquisa,...). Especificamente, em termos matemáticos supõe-se um modelo da forma:

Equação 3.5

$$\Pr(Y = 1|X) = \Phi(X' \beta)$$

onde: \Pr denota a probabilidade;
 Φ distribuição cumulativa de Função (CDF) da distribuição normal padrão; e
 β parâmetro estimados por máxima verossimilhança.

Neste contexto, os modelos de probit podem (e são) aplicados para o cálculo da previsão da extensão de danos à áreas vulneráveis (região atingida pelos danos causados por liberações acidentais), correlacionando a intensidade do efeito físico com o nível de dano esperado (parâmetro a ser atingido de forma binaria, ou seja: morto ou não, destruído ou não, e assim por diante). Nestes contextos, as **equações de Probit** escrevem-se sob a seguinte forma geral:

Equação 3.6

$$Y = K_1 + K_2 \ln(V)$$

Onde,

- Y Probit, que está relacionado com a percentagem de morte na área afetada pelo acidente;
- V Medida da intensidade do efeito físico causador dos danos (sobre pressão, impulso, radiação térmica X tempo de exposição, ou concentração x tempo de exposição);
- K₁, K₂ Parâmetros específicos para cada tipo de dano e de substância.

Os coeficientes, K₁ (parâmetro de localização) e K₂ (parâmetro de inclinação) são determinados a partir de dados empíricos e variam de acordo com o cenário desejado. Com base no modelo de vulnerabilidade, as equações de Probit referem-se aos seguintes efeitos:

Radiação Térmica: morte por queimadura;

Explosão: morte por impacto;

Gás Tóxico: morte por intoxicação.

Ainda tratando de modelos de aproximação, a percentagem de morte na área afetada pelo acidente ora modelado corresponde à função de distribuição acumulada de Y, sendo definida pela equação:

Equação 3.7

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

Esta correspondência matemática pode ser transformada para uma tabela (Tabela 3.9). Estas tabelas, em geral, constroem-se de forma que a primeira linha e a primeira coluna indicam a percentagem de morte na área afetada correspondente aos valores de Probit que constam nas demais linhas e colunas.

Tabela 3.9 Relação entre Probit e a Percentagem de Morte na Área Afetada

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.00	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	4.5	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

Fonte: SA (2008) e CCPS (1989)

3.3.3.1.1 ÁREA VULNERÁVEL A NUVEM DE GÁS TÓXICO

Os efeitos causados por uma nuvem de gás tóxico sobre as pessoas dependem do tipo de gás, da concentração desse gás no ambiente e do tempo que as pessoas ficam expostas.

No caso de gás tóxico, a concentração de interesse corresponde ao valor de concentração que causa morte de certo percentual da população num determinado período de tempo de exposição, determinando assim a área vulnerável a este nível de carga tóxica.

A equação de Probit para morte por exposição à nuvem de gás tóxico tem a forma:

Equação 3.8

$$Y = K_1 + K_2 * \ln(C^n * t)$$

Onde,

K_1 , K_2 e n são parâmetros que dependem da substância tóxica (adimensional);

C é a concentração de material tóxico na nuvem, (ppm);

t é o tempo de exposição.

Assim, podem-se determinar, a partir dos cálculos de dispersão da nuvem tóxica, as áreas correspondentes ao LC1-10 (concentração letal para 1% da população exposta durante um tempo de 10 minutos) e ao LC50-10 (concentração letal para 50% da população exposta durante um tempo de 10 minutos), conforme Manual de Análise de Risco da CETESB.

3.3.3.1.2 ÁREA VULNERÁVEL A RADIAÇÃO TÉRMICA

As áreas vulneráveis devido à ocorrência de incêndio em poça, bola de fogo ou jato de fogo ficam delimitadas pelas linhas de isofluxo térmico correspondentes aos níveis de fluxo térmico de interesse. Estes níveis de interesse podem ser determinados usando-se a equação de Probit. A equação de Probit para morte por queimadura, decorrente tanto de incêndio em poça como de bola de fogo, é dada por:

Equação 3.9

$$Y = -14,9 + 2,56 * \ln(t * I^{4/3} * 10^{-4})$$

Onde,

t é o tempo de exposição à radiação térmica (s);

I = intensidade de radiação térmica (W/m²).

A Tabela 3.10 mostra, para alguns níveis de efeito e tempos de exposição, os valores de fluxo térmico correspondentes. Assim, por exemplo, as linhas de isofluxo térmico de 12,5 kW/m² e 37,5 kW/m², correspondem a probabilidade de morte igual a 1% e 50% das pessoas expostas por um período de 30 segundos e 20 segundos respectivamente e pode ser usada para definir o limite da área vulnerável.

Tabela 3.10 Radiação Térmica X Efeito

EFEITO	RADIAÇÃO TÉRMICA (KW/m²)
50% de letalidade em 20 segundos de exposição	37,5
1% de letalidade em 30 segundos de exposição	12,5
Queimaduras graves para pele em um minuto de exposição	5,0

Fonte: SA (2008) e CCPS(1989)

A duração do efeito de uma bola de fogo gerada pelo BLEVE pode ser calculada pela seguinte correlação:

Equação 3.10

$$T_{BLEVE} = 0,826 * M^{0,26}$$

Onde,

T_{BLEVE} Tempo de duração da bola de fogo, e
M massa inicial do líquido inflamável.

A partir desta equação obtém-se o tempo efetivo de duração do efeito bola de fogo e, a partir da equação de Probit para radiação térmica, calcula-se a radiação térmica gerada em cada cenário acidental.

A análise dos resultados depende da comparação com parâmetros de controle. Estes parâmetros variam conforme o documento de referência utilizado. Usando-se documentos da FEEMA, este cálculo considera uma letalidade de 1%, enquanto que a CETESB fixa os valores para os níveis de radiação térmica em 12,5 kW/m² e 37,5 kW/m².

3.3.3.1.3 ÁREA VULNERÁVEL A EXPLOSÕES

Para a determinação da área vulnerável a explosão de nuvem não confinada devido à liberação de substância inflamável, é considerada a massa da substância liberada que está entre o limite inferior e superior de inflamabilidade. Assim, se a massa encontrada entre estes limites superar a massa mínima necessária para uma explosão a equação de Probit poderá fornecer o percentual de fatalidades na região afetada.

Equação de Probit para morte por hemorragia no pulmão:

Equação 3.11

$$Y = -77,1 + 6,91 * \ln \Delta P$$

Onde, ΔP = sobre pressão (N/m²).

Equação de Probit para morte por impacto é conforme se segue:

Equação 3.12

$$Y = -46,1 + 4,82 * \ln J$$

Onde, J = impulso (N.s/m²).

Outras equações de Probit podem ser usadas para cálculo da percentagem de pessoas que sofrerão outros efeitos de menor severidade e danos, tais como:

- Ruptura de tímpano
- Ferimento por impacto
- Ferimento por fragmentos
- Danos estruturais
- Quebra de vidros

Através destas equações podemos obter a Tabela 3.11:

Tabela 3.11 Níveis de Sobre pressão e Efeito

Efeito	Porcentagem de Morte (%)	ΔP (bar)
Danos reparáveis às estruturas	1	0,1
Danos graves às estruturas	50	0,3

Fonte: SA (2008) e Clancey (1972)

3.3.3.2 LIMITAÇÕES DO MODELO DE PROBIT

Conforme apresentado na seção 3.3.3.1.2, o modelo de Probit para simular áreas vulneráveis devido à ocorrência de incêndio em poça, bola de fogo ou jato de fogo é dada pela Equação 3.9, transcrita como segue:

Equação 3.9

$$Y = -14,9 + 2,56 * \ln(t * I^{4/3} * 10^{-4})$$

Onde,

t é o tempo de exposição à radiação térmica (s);

I = intensidade de radiação térmica (W/m²).

A Equação 3.9 possibilita delimitar linhas de isofluxo térmico correspondentes aos níveis de fluxo térmico de interesse. Estes níveis correlacionam-se com a morte por queimadura, decorrente tanto de incêndio em poça como de bola de fogo, mas não a física do evento.

Conforme discutido na seção 3.3.3.1, as equações de Probit restringem-se a avaliar frações do problema, ficando limitadas aos critérios adotados na seleção dos parâmetros adotados nos cálculos e a respostas binárias e dependentes da “pergunta a que se deseja responder”.

Os modelos de probit não geram campos de pressão, temperatura ou outras variações, limitando-se apenas a definir fronteiras de um evento analisado. Os parâmetros alimentados nas equações de probit servem para avaliar se a resposta de um sistema, enquanto a resposta for “0” uma nova interação numérica é efetuada. No momento em que a resposta passa para “1”, as condições da resposta mudam, definindo a fronteira.

Desta forma, os modelos de probit somente podem ser aplicados para validar uma hipótese. Hipótese esta que é a condição (parâmetro) estabelecida nas normas ambientais disponíveis para os estudos de risco ambiental. Estes parâmetros ambientais são, para a FEEMA, por exemplo, os cálculos do alcance de cada bola de fogo, que consideram letalidade de 1%. Ou seja, a linha de fronteira será traçada quando a resposta gerada, aplicando-se os modelos de probit pare de gerar uma resposta positiva a este parâmetro. A CETESB por sua vez fixa os valores para os níveis de radiação térmica (em 12,5 kW/m² e 37,5 kW/m²), traçando duas linhas isotérmicas usando-se os modelos de probit.

Apesar de haver modelos de aplicação de probit para componentes de um BLEVE (tempo de duração do efeito de uma bola de fogo) (Equação 3.10), estes não modelam o BLEVE ou seus estados transientes, sendo aplicáveis na definição de áreas afetadas e níveis de temperatura (que se associam a letalidades). Ainda mais: estes dois resultados são obtidos aplicando-se parâmetros pré-definidos para as constantes da equação de Probit.

Em resumo, pode-se estabelecer que as avaliações de risco ambiental através das equações de Probit **NÃO** (grifo do autor) são avaliações de risco quando observados os critérios adotados pela ISO 31.000 e pela MIL STD 882 (ESTADOS UNIDOS, 2003), para citar apenas duas referências. Isto se deve ao fato de que as equações de Probit tratam apenas de uma das componentes do risco (severidade), limitando-se a projetar a extensão dos danos no caso de um evento (acidente), desconsiderando os componentes de frequência.

Alia-se a isso o fato de que os resultados obtidos com as equações de Probit são extremamente limitados aos parâmetros de controle adotados. Estes parâmetros de controle por sua vez dependem dos documentos normativos adotados para referenciar a análise. A Tabela 3.12, por exemplo, apresenta comparativamente os critérios (parâmetros de controle) utilizados para a os cálculos das distâncias de segurança conforme Normas da CETESB (SAO PAULO, CETESB, 2001) e da FEEMA (RIO DE JANEIRO, FEEMA, 1999)

Tabela 3.12 Parâmetros para determinação de distâncias, conforme CETESB e FEEMA

Risco	Critérios	
	CETESB	FEEMA
Considerado		
Nuvens Toxicas	Concentrações tóxicas que correspondem às probabilidades de 1% e 50% de fatalidade	Concentração imediatamente perigosa a vida ou saúde humana (IDLH) e concentração correspondente a 1% de letalidade
Incêndios	Correspondentes aos níveis de radiação térmica de 12,5 kW/m ² e 37,5 kW/m ²	Fluxo de radiação térmica de 5 kW/m ² e fluxo correspondente a 1% de letalidade
Explosões	Níveis de sobre pressão de 0,1 bar e 0,3 bar	Nível de sobre pressão igual a 0,069 bar e correspondente a letalidade de 1%
Nuvens Inflamáveis	Corresponde ao limite Inferior de Inflamabilidade (LII) da substância	Concentração do limite Inferior de Inflamabilidade (LII) da substância
BLEVE	Níveis de sobre pressão de 0,1 bar e 0,3 bar	Fluxo de radiação térmica correspondente a 1% da letalidade

Fonte: SA, 2008

4 APRESENTAÇÃO DO “*BOILING LIQUID EXPANDING VAPOR EXPLOSION*”

Como caso de estudo para analisar as aplicabilidades, limitações e desvios, bem como pontos fortes e fracos das análises de risco quando aplicadas a um cenário ambiental, o BLEVE foi usado como modelo.

4.1 TEORIA DA COMBUSTÃO

Esta seção começa com uma breve discussão sobre os princípios e fenômenos por trás de uma reação de combustão. Além disso, os princípios por trás da formação de uma chama são avaliados, pois eles são fundamentais para o desenho escolhido utilizado nesta tese.

4.1.1 Princípios de Combustão

A combustão é uma reação química de oxidação, exotérmicas, nas quais os produtos são de energia (geralmente na forma de calor), a luz da chama e gases. Os reagentes da combustão são um composto oxidante (geralmente oxigênio) e combustível, que será oxidada (ESTADOS UNIDOS - TM9-1300-214, 1984; NFPA, 2002; KUO, 1986). Quimicamente, o agente oxidante é a espécie química responsável por fornecer os átomos de oxigênio que serão envolvidos na reação em si.

A maneira geral, e mais simples, para representar esta reação é a utilização do triângulo do fogo (Figura 4-1), que liga os três componentes fundamentais da combustão: oxidante, combustível e energia de ativação (calor).

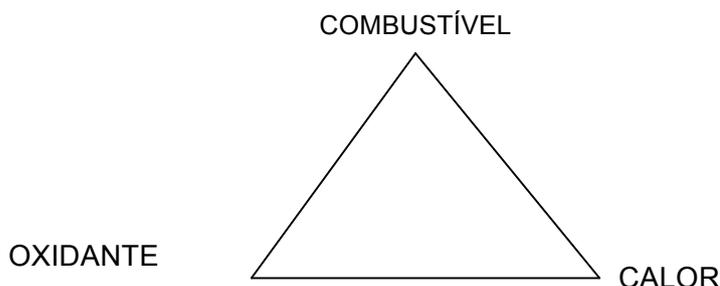


Figura 4-1 Triângulo do Fogo

No entanto, o "fogo" não pode ser plenamente representado somente considerando-se a sinergia desses três elementos. O "fogo" é o produto final de uma reação de combustão, pois requer auto-sustentabilidade, o que significa que, uma vez iniciada, a reação em si é capaz de sustentar-se, assumindo-se a presença destes três componentes fundamentais (combustível, calor e oxidante). A este quarto elemento chama-se reação em cadeia.

Portanto, uma nova figura geométrica é necessária para acomodar os quatro elementos necessários para sustentar um "fogo". A figura geométrica escolhida foi o tetraedro (Figura 4-2):

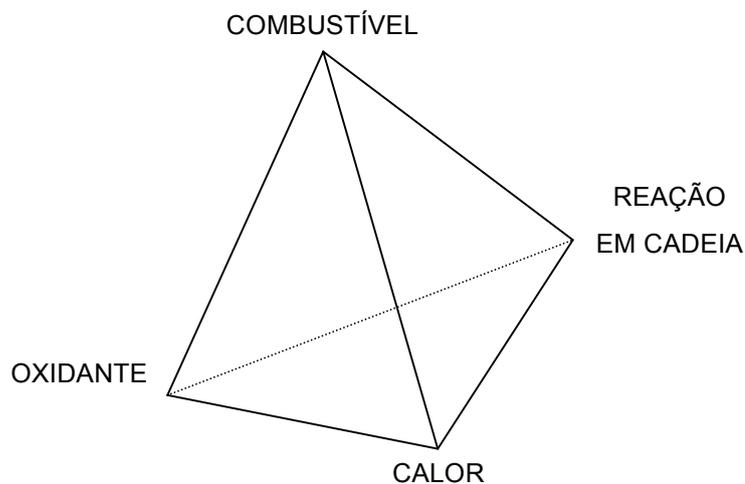


Figura 4-2 Tetraedro de Fogo

Este conceito é importante para definir detonação, que é considerada uma reação de combustão ocorrendo a elevadas taxas de globais de reação.

"Combustão e detonação de materiais energéticos são reações exotérmicas do tipo redox. A reação é autossustentável após a energia de ativação ter sido aplicada." (ESTADOS UNIDOS – TM9-1300-214, 1984)

Em termos de reação química, KUO (1986), MEYER (1977) e AKHAVAN (2000) possibilitam determinar que a combustão, deflagração e detonação são equivalentes. No entanto, a velocidade global da reação difere. A Detonação é mais veloz que a deflagração, que por sua vez supera a velocidade global de reação da combustão.

A velocidade global da reação é determinada pela soma das várias etapas envolvidas nesta. Conforme FOGLER, o mais simples conjunto de passos são os seguintes:

- Difusão dos reagentes,
- Reação química propriamente dita, e
- Difusão de produtos.

Considerando os reagentes são similares para os três regimes de combustão (combustível (na forma de gás) e oxidante) (ESTADOS UNIDOS – NFPA, 2002), é provável que o passo (ii) tenha velocidades semelhantes (ou ao menos de mesma ordem de grandeza), sendo o principal responsável pela variação da velocidade global de reação de queima o componente difusivo.

A taxa de difusão é aumentada pelo aumento da "disponibilidade" de oxigênio para reagir (esta é uma das razões pelas quais a TNT (um explosivo químico) que tem oxigênio e combustível na mesma molécula queima mais rápido que a pólvora negra (um explosivo mecânico), composto onde as espécies oxidantes e combustíveis existem em compostos químicos diferentes, mas em uma mesma mistura mecânica)

"deflagração de propulsores antecede o mesmo que queima normal. A combustão ocorre sobre a superfície e as receitas para o grão. A taxa de fatores determinantes na reação são a taxa de transferência de calor no grão propelente, a partir da superfície de gravação e a taxa de decomposição da formulação de propelente. A taxa de transferência de calor depende da pressão dos produtos de combustão. A velocidade de combustão é definida como a taxa na qual a superfície de gravação consome um grão propelente em uma direção perpendicular à superfície de grãos. Detonação de explosivos é um processo completamente diferente do que deflagração." (ESTADOS UNIDOS – TM9-1300-214, 1984)

No entanto, não só a disponibilidade de comburente para reagir prontamente com o combustível suficiente para garantir uma detonação como o regime de queima de favoritos. Para obter uma detonação sustentável, uma elevada taxa de queima (velocidades de ordem supersônica) deve ser garantida em todo o material combustível (explosivo).

4.1.2 Desenvolvimento do Incêndio

Conforme apresentado no manual de incêndio da NFPA (ESTADOS UNIDOS, NFPA, 2002), o incêndio pode ser estudado modelando-o em três estágios de desenvolvimento. Na primeira fase o oxigênio contido no ar ainda existe em quantidade suficiente para a chama gerar vapor d'água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂) e monóxido de carbono (CO) dentre outros gases. Grande parte do calor é utilizada no aquecimento dos combustíveis, e a temperatura do ambiente, neste estágio, ainda é da mesma ordem de grandeza daquela anterior à fase 01.

Na fase seguinte ocorre a queima livre, quando o ar rico em oxigênio é arrastado para dentro do ambiente pelo efeito da convecção (o ar quente sobe e sai do ambiente, forçando a entrada de ar fresco). Os gases aquecidos espalham-se preenchendo o ambiente e, de cima para baixo, forçam o ar frio a permanecer junto ao solo, e eventualmente causam a ignição dos combustíveis nos níveis mais altos do ambiente. Este ar aquecido é uma das razões pelas quais os bombeiros devem se manter abaixados e usar o equipamento de proteção respiratória, pois uma inspiração desse ar aquecido pode queimar os pulmões, podendo a temperatura nas regiões superiores exceder a 700°C (nível do teto).

Na fase de queima livre, o fogo aquece gradualmente todos os combustíveis do ambiente e quando os mesmos atingem seu ponto de ignição haverá uma queima instantânea, simultânea e concomitante desses produtos, o que poderá provocar uma explosão ambiental, ficando toda a área envolvida pelas chamas, fenômeno conhecido como "**Flash over**".

Na fase de queima lenta, o fogo continua a consumir oxigênio até atingir um ponto onde o comburente é insuficiente para sustentar a combustão. Nessa fase as chamas podem deixar de existir se não houver Oxigênio suficiente para mantê-las (0 - 8% de oxigênio) O fogo é normalmente reduzido a brasas, o ambiente torna-se completamente ocupado por fumaça densa e os gases se expandem. Devido à pressão interna ser maior que a externa, os gases saem por todas as fendas em forma de lufadas, que podem ser observadas em todos os pontos do ambiente. O calor intenso reduz os combustíveis a seus componentes básicos, liberando vapores combustíveis.

4.1.3 Formação de Chama

Para aprofundar a análise de um processo de combustão, uma simples vela é usada como modelo. Isto se deve a vela ser uma das formas de chama mais simples utilizadas pela humanidade e simultaneamente englobar uma grande complexidade de fenômenos físicos, como demonstra o trabalho de KUO (1986).

A chama autossustentada começa quando o "fogo" colocado na faixa da vela, que aquece a cera (que é o combustível propriamente dito) até que ele atinja sua temperatura de volatilização, também conhecido como "ponto de inflamação" (ESTADOS UNIDOS, NFPA, 2002). Neste ponto, a cera começa a perder massa (combustível), sob a forma de vapor.

Este vapor difundisse "contra" a atmosfera, onde se mistura com o ar (uma fonte de oxigênio). Esse processo continua a ocorrer, aumentando a concentração de combustível na atmosfera perto do topo da vela, até o ponto no qual a relação entre combustível e oxigênio na mistura é suficiente para sustentar uma reação química. A Figura 4-3 ilustra este fenômeno.

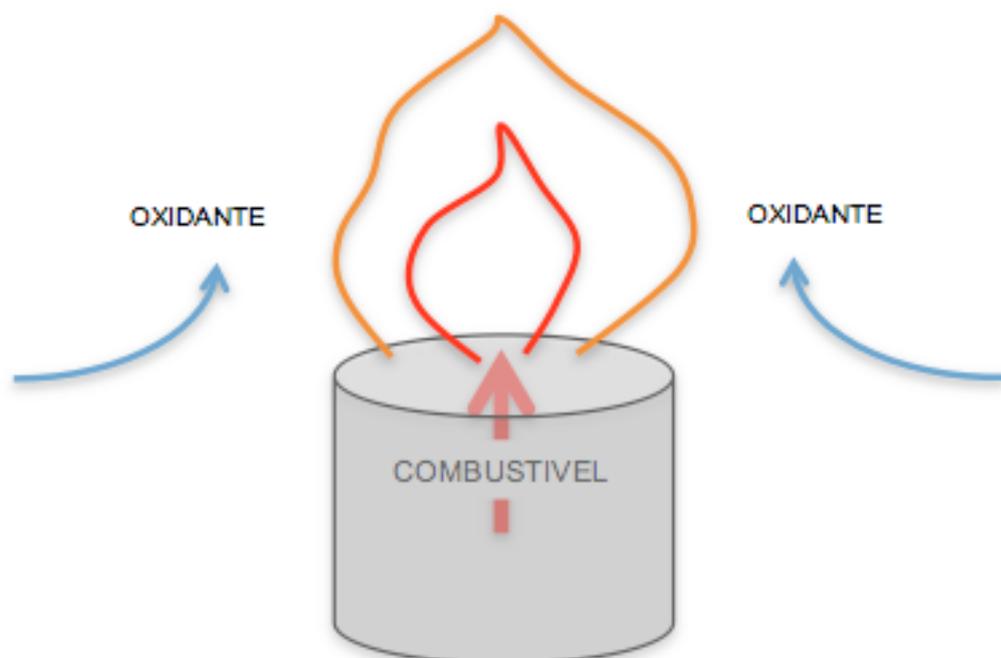


Figura 4-3 Modelo de Vela para chama difusiva

Neste ponto, o calor da fonte de ignição aciona a mistura, e a chama da vela é então formada. Deste ponto em diante, a chama se torna autossustentável, onde o calor da chama volatiliza mais combustível (cera) da vela, que então se mistura com o ar para formar mais mistura inflamável. Esta “nova” mistura inflamável é ignitada pelo calor das chamas, completando o ciclo (KURO 1986).

Em termos técnicos, o fenômeno descrito no parágrafo anterior pode ser definido como um processo regido pelas difusões de calor e massa. A fonte de calor (que são a fonte primária de calor ou a chama em si) difunde o calor para a cera, que libera combustível na forma de vapor, uma vez que o ponto de fulgor da cera foi alcançado. Este vapor difunde-se no ar, criando uma mistura inflamável. Como a temperatura continua subindo, a temperatura de ignição da chama é alcançada, acendendo-a. A partir deste momento, a fonte de difusão de calor é a própria chama.

É importante ressaltar que a difusão do combustível também é influenciada pelo efeito do calor, uma vez que o aumento da temperatura provoca um aumento da pressão e do volume da mistura. Este incremento é diretamente proporcional, sendo regido pela equação de Clapeyron para os gases ideais (Equação 4.1). Este aumento de volume, temperatura e pressão faz com que a mistura torne-se menos densa que o ambiente, fazendo esta mover-se para “cima”. Esta é uma das principais causas para a forma de uma chama de vela para ser mais larga na base e estreita no topo.

Equação 4.1

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Onde:	P	Pressão
	V	Volume
	n	numero de moles do gás
	R	Constante real dos gases
	T	Temperatura

Este princípio é o mesmo para todas as chamas e reações de combustão. Estes princípios são matematicamente escrito sob a forma de equações fundamentais.

4.1.4 Equações Fundamentais

A física envolvida no processo de combustão pode ser representando por um conjunto de equações fundamentais (Kuo, 1986; FORTUNA, 2000; MALISKA, 2004, TANNEHILL, 1997; MEYER, 1977) que se prestam para simular e prever o comportamento de um determinado sistema ou experiência.

Os princípios físicos que são aplicados para estudar uma reação de combustão são basicamente quatro, a saber:

- a. Conservação da Quantidade de Movimento (velocidades),
- b. Conservação da massa,
- c. Conservação de energias, e
- d. Difusão de espécies

A velocidade é tratada através da conservação da quantidade de momento linear (QML). A conservação de QML, quando aplicada a um fluido, é retratada pela equação de Navier-Stokes, e esta pode ser escrita de forma compacta (sem aplicar os operadores a nenhum sistema de coordenadas e ignorando-se os termos convectivos) conforme a **Equação 4.2**. Na Equação de Navier-Stokes o termo da esquerda representa a evolução do campo de velocidade ao longo do tempo, enquanto que o primeiro termo do lado direito representa o gradiente de velocidades no espaço. O ultimo termo introduz para a equação os efeitos da pressão.

Conservação da Quantidade de Momento Linear (QML):

Equação 4.2

$$\frac{DU}{Dt} = v\nabla U - \frac{1}{\rho}\Delta P$$

A equação que retrata a conservação de massa é derivada do balanço de massa. Para fluidos incompressíveis e newtonianos, a equação da conservação de massa é a equação da continuidade, cuja forma é apresentada na **Equação 4.3**

Conservação de Massa

Equação 4.3

$$\nabla(\rho v) = 0$$

À semelhança da equação de Navier-Stokes, a conservação de energia se constitui de um termo transiente (variação da temperatura ao longo do tempo), um termo que representa o campo de temperatura no espaço e termos fontes. De forma genérica e independente do sistema de coordenadas, a conservação de energia escreve-se conforme apresentada na **Equação 4.4:**

Conservação de Energia

Equação 4.4

$$\frac{DT}{Dt} = -\alpha \nabla^2 T + Q$$

A **Equação 4.4** que retrata a conservação de temperatura pode ser entendida como uma variação da forma genérica de uma equação que trata da difusão de alguma grandeza física (termo transiente, termo difusivo e termo fonte), tal como espécies químicas (difusão de massa).

4.2 EXPLOSÃO

Múltiplas fontes, tais como AKHAVAN (2000), MEYER (1977), COOPER (1996) e os órgãos militares dos EUA (TM9-1300-214, 1984), definem explosivos diferentemente, mas o núcleo da definição permanece sempre o mesmo. Para citar apenas uma fonte, Rudolf Meyer (MEYER, 1977) define explosivo como sendo:

"Explosivos são substâncias sólidas ou líquidas, isoladamente ou misturados uns com os outros, que estão em um estado metaestável e são capazes, por isso, de sofrer uma reação química rápida, sem a participação dos reagentes externos, tais como oxigênio atmosférico. A reação pode ser iniciada por meios mecânicos (impacto, impacto de sensibilidade; fricção, fricção Sensibilidade), pela ação do calor (faísca, chama aberta, encarnado ou branco quente objetos), ou pela detonação de choque. A resistência do estado metaestável de calor é conhecido como Estabilidade". (Rudolph Meyer)

Esta definição, dada por Rudolf Meyer (MEYER, 1977), é completa e deixa poucas possibilidades para uma discussão mais aprofundada.

A termodinâmica moderna tem suas bases nos experimentos e correlações empíricas. Este conhecimento básico é transcrito nas leis da termodinâmica. Esse mesmo conjunto de leis é usado para descrever o transporte de calor e trabalho em processos termodinâmicos.

Há quatro leis da termodinâmica: A lei zero define a temperatura como uma propriedade do sistema, a primeira lei da termodinâmica (conservação da energia). A segunda lei define entropia como uma propriedade de um sistema, enquanto a terceira lei define o zero absoluto como a ausência de temperatura.

Quanto explosivos, a primeira lei pode ser usada para definir mais um explosivo e explosão. Matematicamente, a primeira lei foi escrita como pode ser observado na **Equação 4.5**

Equação 4.5

$$dU = \delta Q - \delta W$$

Onde:

U	energia interna do sistema
Q	calor trocado entre o sistema e arredores
W	trabalho realizado pelo sistema sobre seu entorno

Quanto explosivos, a energia interna, U, pode ser associada à energia armazenada em suas ligações químicas, e o calor (Q) pode ser descartado durante uma detonação, devido à característica adiabática da reação.

Além disso, os princípios termodinâmicos usados para analisar explosivos permitem compreender as razões pelas quais estes (explosivos) diferem em suas capacidades energéticas. Como a capacidade de um explosivo para realizar o trabalho está relacionada à quantidade de energia armazenada dentro de suas ligações químicas, é esperado que diferentes explosivos (com composições químicas diferentes) tenham diferentes capacidades energéticas.

4.3 BLEVE

O termo "BLEVE" é um acrônimo em língua inglesa para "*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*" que foi inventado em 1957 por JB Smith, foi Marsh, e W.L. para Paredes, ambos da Factory Mutual Research Corporation. Eles analisaram o modo provável de falha de um recipiente contendo uma mistura superaquecida de formol e fenol, e acreditava que o contêiner tinha sofrido uma "explosão de vapor líquido de expansão". (KLETZ, 1988; KHAN, 1998; LEES, 1996; CASAL, 2001)

O Centro de Processos Químicos Segurança (CCPS, 1989) definiu explosão de vapor líquido de expansão (BLEVE) como sendo a liberação repentina de uma grande massa de líquido superaquecido sob pressão para a atmosfera. Esta liberação súbita pode ocorrer devido a uma falha de confinamento causado por envolvimento em fogo, de corrosão, defeitos de fabricação, superaquecimento interno. Contudo, para que seja considerado BLEVE, faz-se necessário que ocorra combustão do fluido após a sua liberação para a atmosfera, resultando em bola de fogo. Ressalta-se que a bola de fogo observada em um BLEVE não é uma explosão, uma vez que o regime de queima não é o de detonação.

Em outras palavras, BLEVE pode ser definida como um evento que combina dois eventos (fases) distintos. A primeira fase consiste na explosão mecânica que libera o combustível para a atmosfera, enquanto que a segunda fase é regida pela ignição da mistura inflamável e subsequente formação da bola de fogo.

A primeira fase é definida pela falha mecânica para o recipiente do combustível. Comumente essa falha é devido ao aumento na pressão do combustível (combustível sob a forma de vapor ou gasoso) acima da resistência mecânica do recipiente. Isso faz com que o recipiente rompa-se e libere o combustível para a atmosfera. Supondo que um incêndio, a pressão do combustível dentro do recipiente irá aumentar devido ao aumento de sua temperatura. Desta forma, o próprio fogo foi o causador da explosão mecânica que define a primeira fase.

Ressalta-se que o fogo também afeta a resistência mecânica dos metais, reduzindo-a a medida que a pressão do fluido contido aumenta

A segunda e mais característica fase do BLEVE (KLETZ, 1988; KHAN, 1998; LEES, 1996; CASAL, 2001) depende da temperatura e natureza do fluido liberado na fase um.

Considerando um combustível aquecido a temperaturas superiores ao seu ponto de ignição (que foi a razão pela qual BLEVE é uma preocupação no combate a incêndio em um reservatório de combustível), uma bola de fogo seguirá a explosão mecânica tão logo condições de inflamabilidade sejam atingidas (quantidades estequiométricas entre combustível e comburente).

O mecanismo de formação da bola de fogo está intimamente relacionado as pressões que levaram a explosão mecânica da fase 01. Tendo ocorrida a falha do recipiente na fase 01, o combustível liberado expande-se contra o ambiente (mais especificamente, contra o ar), impulsionado pelos gradientes de pressão derivados da condição inicial (pressão do fluido contido no recipiente antes da falha deste). Esta expansão deixa um vácuo parcial em seu epicentro, que faz com que o ar se desloque para o interior. Devido ao movimento das espécies químicas através de si e da presença de alta temperatura, um incêndio começa. Este fogo rapidamente se desenvolve para uma combustão completa (não detonação) do combustível. Esta combustão completa é observada como uma bola de fogo. (KLETZ, 1988; KHAN, 1998; LEES, 1996; CASAL, 2001)

4.3.1 Mecanismo do BLEVE

De forma simples o BLEVE pode ser descrito (BUBBICO, 2008) como sendo um evento onde existe despressurização instantânea seguida de bola de fogo. Assumindo um tanque, despressurização não é instantânea. O líquido dentro do vaso, que até então estava em uma temperatura correspondente a uma alta pressão, é de repente a pressão atmosférica, mas em uma temperatura bem acima da pressão atmosférica do líquido com ponto de ebulição. Em outras palavras, o líquido é superaquecido. A Figura 4-4 representa um tanque de combustível, parcialmente cheio, sendo aquecido.

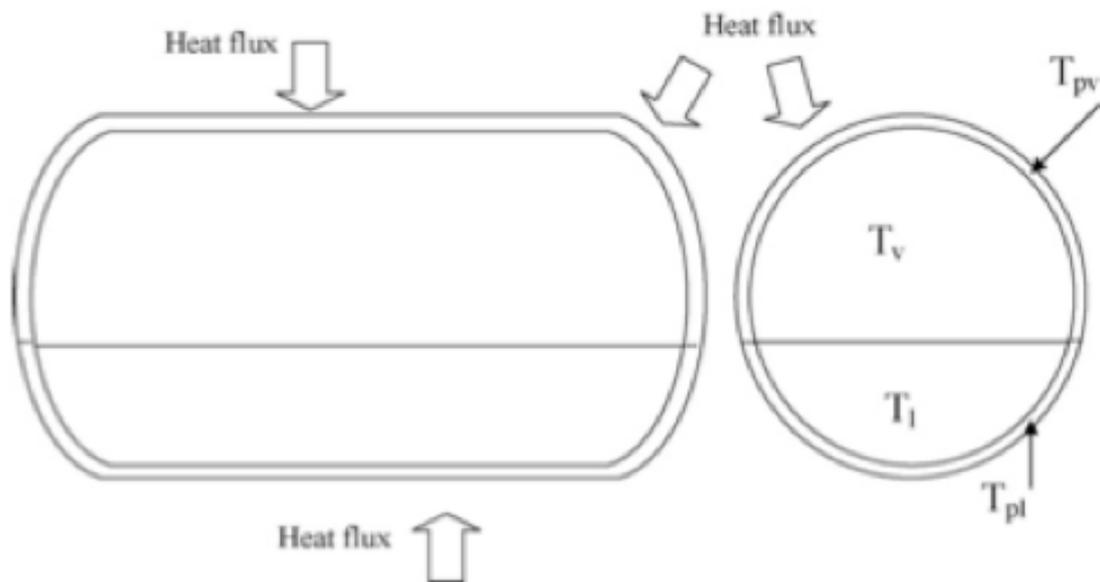


Figura 4-4 Esquema de Tanque com os fluxos de calor

Fonte: Bubbico, 2008

Devido as suas particularidades e natureza, cada líquido responde ao fluxo de calor diferentemente (assumindo temperaturas diferentes), o que interfere sobremaneira no metal do tanque para a região de interface dos dois fluidos.

Se o líquido no recipiente for subitamente despressurizado (principalmente devido a falha catastrófica do recipiente), haverá a nucleação instantânea e homogênea. Isso poderia causar uma súbita e violenta evaporação de grande parcela do líquido, resultando em um BLEVE.

Este evento pode ocorrer em faixas de tempo da ordem de um ms de despressurização, provocando uma liberação maciça de uma mistura líquido-vapor. Se o líquido em um vaso de pressão for subitamente despressurizado enquanto estiver superaquecido (em temperaturas acima das de fulgor e ignição) um BLEVE ocorreria. Isto se deve porque ondas de despressurização, entre outros fatores, estariam agitando o líquido quando enquanto uma rachadura se desenvolve nas paredes do tanque. Alia-se a isto a presença de sítios de nucleação heterogênea, o causaria a explosão de ebulição-com-vaporização, desencadeando o BLEVE (BUBBICO 2008)

Como a bola de fogo cresce, a turbulência do fogo arrasta o ar para dentro da bola de fogo. Simultaneamente, a radiação térmica vaporiza as gotículas de líquido e aquece a mistura.

Como resultado desses processos, toda a massa turbulenta aumenta de volume, evoluindo para uma forma aproximadamente esférica. Essas bolas de fogo podem desenvolver extremas intensidades de radiação térmica (BUBBICO 2008).

O tamanho, a duração e a intensidade de radiação de uma bola de fogo pode também depender da temperatura inicial do combustível (antes da explosão mecânica). As bolas de fogo oriundas de um BLEVE são esferoidais quando totalmente desenvolvida, enquanto que nos instantes iniciais estas possuem a forma de cogumelo.

Tomando por base as características do BLEVE (picos de pressão, geração de radiação térmica, entre outros) este (BLEVE) encontra-se associado a um significativo potencial para causar danos. Este potencial de danos do BLEVE indica a premente necessidade de gerenciar riscos e determinar as vulnerabilidades de cenários adjacentes.

4.4 MODELAGEM MATEMÁTICA DA FÍSICA DA COMBUSTÃO

Tratando especificamente de BLEVE, as modelagens propostas pelas equações de Probit generalizam sobremaneira o fenômeno, buscando apenas definir linhas de limite para a extensão de danos pré-estabelecidos. A análise detalhada deve ser feita usando-se a física envolvida no evento, que matematicamente é retratada através das equações básicas.

Em seu livro, KUO (1986) analisa o processo de combustão e apresenta as equações fundamentais que devem ser usados para prever e predizer o comportamento de um determinado sistema ou experiência reativo. Estas equações são, basicamente, as mesmas equações necessárias para descrever uma combustão e abordadas na seção 4.1.4 deste capítulo, acrescidas da difusão de espécies:

Conservação da Quantidade de Movimento Linear (QML):

Equação 4.2

$$\frac{DU}{Dt} = v\nabla U - \frac{1}{\rho}\Delta P$$

Conservação de Massa

Equação 4.3

$$\nabla(\rho v) = 0$$

Conservação de Energia

Equação 4.4

$$\frac{DT}{Dt} = -\alpha \nabla^2 T + Q$$

Há também a necessidade de abordar a difusão de massa, uma vez que antes da explosão mecânica (primeira fase do BLEVE) todos os combustíveis estão contidos por um cilindro (sob pressão) e o oxidante (ar) existe em torno do cilindro. A equação de difusão de massa é responsável por determinar o grau de mistura entre os dois reagentes (neste caso, combustível e oxigênio). Num primeiro momento, a difusão de massa será ignorada, sendo introduzida subsequentemente.

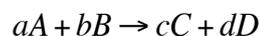
Na **Equação 4.4**, "Q" representa a fonte de aumento da temperatura. A fim de proporcionar uma equação para Q, que deve ser entendido que Q é dependente da taxa de reação em um determinado momento. Assim:

Equação 4.6

$$Q = V * q$$

Onde "V" representa a taxa de reação e q para o total de energia termodinâmica, uma vez que os reagentes conseguem uma mistura inflamável devido à sua concentração relativa.

Supondo que uma reação química de segunda ordem do tipo:



O modelo de "V" pode ser obtido a partir da cinética química e relações equação de Arrhenius (CASTELAN), e a equação para "q" deriva do conhecimento termodinâmico:

Equação 4.7

$$V = -\frac{[reactants]}{r} = k * e^{\frac{-Ea}{RT}}$$

Equação 4.8

$$\left. \begin{array}{l} C_p = \frac{dH}{dT} \\ P = \text{Pr essão} = \text{cte} \end{array} \right\} \Rightarrow dQ = dH = C_p dT \Rightarrow q = C_p(T) dT$$

Desta forma, o termo fonte para temperatura pode ser modelado pela equação:

Equação 4.9

$$Q = k * e^{\frac{-Ea}{RT}} * C_p(T) * dT$$

Portanto, trabalhando a **Equação 4.9** na conservação de energia para este fenômeno é:

Equação 4.10

$$\frac{dT}{dt} = -\alpha \cdot \nabla^2 T + k \cdot e^{\frac{-Ea}{RT}} \cdot C_p(T) \cdot dT$$

Concluindo, o sistema de equações a ser resolvido para os campos de velocidade e temperatura é o seguinte:

Equação 4.2

$$\frac{dU}{dt} = v \nabla U - \frac{1}{\rho} \Delta P$$

Equação 4.3

$$\nabla(\rho v) = 0$$

Equação 4.10

$$\frac{dT}{dt} = -\alpha \nabla^2 T + k * e^{\frac{-Ea}{RT}} * C(T) dT$$

Para simular os campos de massa, temperatura e velocidade geradas por um BLEVE faz-se necessário “apenas” resolver o sistema formado pelas **Equação 4.2**, **Equação 4.3** e **Equação 4.10** acrescidos dos meios para resolver a difusão de massa. Usualmente, este sistema de equações é solucionado utilizando a técnica dos elementos finitos (ou volumes finitos, dependendo do cenário) e discretização do espaço real em um domínio computacional.

Os documentos escritos por FORTUNA (2000), MALISKA (2004) e TANNEHILL (1997) apresentam diversas opções para este processo de discretização, viáveis para tratar destas

equações. Estas técnicas de discretização encontram-se fora do escopo desta tese.

Contudo, devido à complexidade dos fenômenos reais, a solução dos modelos matemáticos (qualquer que seja a técnica de discretização adotada) requer que haja um conjunto de hipóteses simplificadoras. Estas hipóteses são usadas para definir as condições inicial, de contorno e as hipóteses de simplificação, necessárias para a execução de cálculos, restando ainda modelar as demais particularidades de um sistema reativo, culminando na modelagem da bola de fogo.

4.5 MODELAGEM DE SISTEMA REATIVO

Antes de ser possível adaptar as equações fundamentais para um sistema reativo, faz-se necessário redefinir algumas grandezas fundamentais, tais como velocidade média e fluxos de massa.

4.5.1 Velocidades

Os componentes da mistura (reagentes e produtos) apresentam velocidades diferentes, o que impacta na equação de Navier Stokes. Desta forma, as velocidades de cada espécie são aproximadas para:

Equação 4.11

$$\text{Velocidade Mássica Média: } \bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i \bar{v}_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i}$$

Equação 4.12

$$\text{Velocidade Molar Média: } \bar{v}^* = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \bar{v}_i^*}{\sum_{i=1}^n C_i} = \sum_{i=1}^n X_i \bar{v}_i^*$$

Onde:

- \bar{v}_i velocidade da espécie "i" em relação a um referencial fixo
- \bar{v}^* Velocidades médias em relação a um referencial fixo
- ρ Massa específica da espécie "i"
- C concentração a espécie "i"

X Fração molar da espécie "I"

Desta forma, obtém-se o conjunto das velocidades relativas ao escoamento médio:

Velocidade mássica de Difusão

Equação 4.13

$$\bar{v}_i = \bar{v}_1 - \bar{v}$$

Velocidade Molar de Difusão

Equação 4.14

$$\bar{v}_i^* = \bar{v}_1 - \bar{v}^*$$

4.5.2 Fluxo Mássico e Fluxo Molar

Define-se fluxo mássico/molar como sendo a quantidade vetorial que representa a quantidade de massa/moles que atravessa uma área unitária por unidade de tempo. Matematicamente, tem-se:

Para um referencial fixo:

Equação 4.15

Fluxo mássico: $\bar{m}_i = \rho_i \bar{v}_i$

Equação 4.16

Fluxo Molar $\bar{n}_i = C_i \bar{v}_i^*$

Para um referencial relativo:

Equação 4.17

Fluxo mássico: $\bar{J}_i = \rho_i (\bar{v}_i - \bar{v}) = \rho_i \bar{v}_i$

Equação 4.18

Fluxo Molar $\bar{J}_i^* = C_i (\bar{v}_i - \bar{v}^*) = C_i \bar{v}_i^*$

O entendimento destas grandezas possibilita modelar a difusão de massas, que possibilita construir a quarta equação necessária para compor o sistema de equações fundamentais que definem o fenômeno físico: a difusão de massa. A difusão de massas é modelada através da Lei de Fick.

4.5.3 Difusão de Espécies: Lei de Fick

A lei de Fick estipula o fluxo molar relativo como a “quantidade” a ser difundida. Deste princípio, por analogia, a Lei de Fick propõe que a difusão de massas comporta-se, matematicamente, de modo análogo a difusão de energia. Matematicamente e independente de sistema de coordenadas, a Lei de Fick se escreve como se segue:

Equação 4.19

$$J_A^* = -c^* D_{AB}^* \nabla x_A$$

Reescrevendo-se a Equação 4.19 em termos de fluxo molar, tem-se:

Equação 4.20

$$\bar{n}_A^* = C_A v^* + (-c^* D_{AB}^* \nabla x_A)$$

Onde o termo $C_A v^*$ deve-se ao escoamento médio, enquanto que o termo $(-c^* D_{AB}^* \nabla x_A)$ deve-se a difusão superimposta ao escoamento médio.

Em termos de massa, a Lei de Fick (Equação 4.19) escreve-se:

Equação 4.21

$$J_A = -\rho^* D_{AB}^* \nabla y_A$$

Equação 4.22

$$\bar{m}_A^* = -\rho_A \bar{v} + (-\rho^* D_{AB}^* \nabla y_A)$$

As difusões de massa regidas pela Lei de Fick afetam o movimento de espécies, e desta forma, afetam as equações de continuidade.

4.5.4 Equação da Continuidade em Sistemas Reativos

A equação de continuidade toma como ponto de partida o Balanço de massa. De forma genérica, os balanços de massa para cada espécie química são escritos como se segue:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Massa que} & & \text{Massa que} & & \text{Massa} & & \text{Variação} \\ \text{entra} & - & \text{sai} & + & \text{gerada (*)} & = & \text{de massa} \end{array}$$

(*) Ressalta-se que para que a espécie química “a” seja gerada, outra espécie química deve ser consumida.

A fim de quantificar o modelo do balanço de massa, toma-se um elemento de volume (Figura 4-5) como parâmetro para estabelecer balanço de massa:

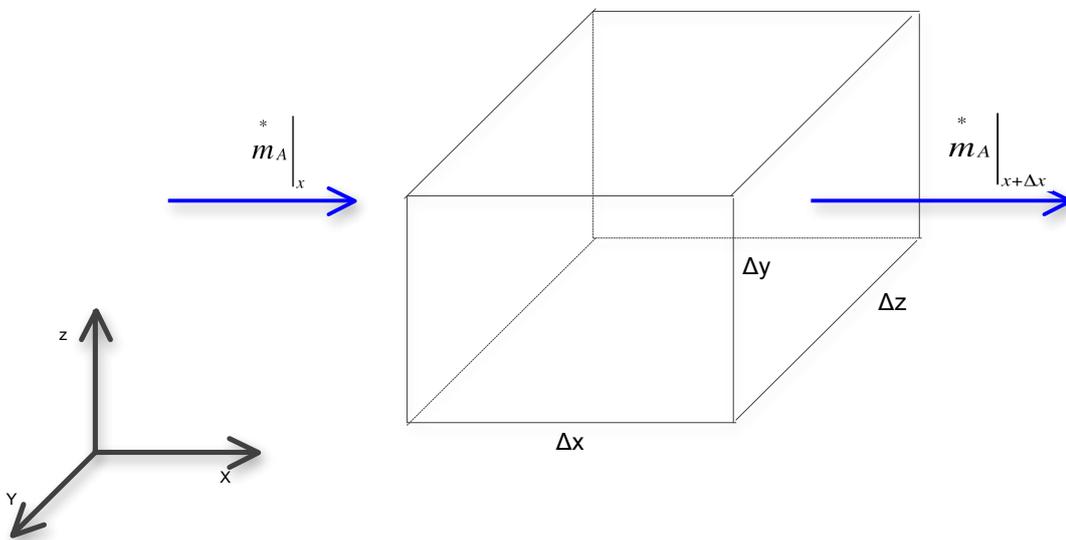


Figura 4-5 Elemento de volume

Desta forma, tomando uma espécie química “A”, os termos em unidades mássicas são como se seguem:

$$\text{Variação de Massa de A: } \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z$$

Massa que entra em X: $m_A \Big|_x \Delta y \Delta z = \left[m_A \Big|_x + \frac{\partial m_A}{\partial x} \Delta x \right] \Delta y \Delta z$

Massa que sai em X+Δx: $m_A \Big|_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z$

Taxa de Geração de A no elemento de volume: $W_A \Delta x \Delta y \Delta z$

Acoplando todas estas equações, o balanço de massa é como se segue:

Equação 4.23

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z = m_A \Big|_x \Delta y \Delta z - m_A \Big|_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z + W_A \Delta x \Delta y \Delta z$$

A Equação 4.23 reescreve-se para:

Equação 4.24

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z = - \frac{\partial m_A}{\partial x} \Big|_x \Delta x \Delta y \Delta z + W_A \Delta x \Delta y \Delta z$$

Que em um sistema unidimensional reescreve-se como $\frac{\partial \rho_A}{\partial t} = - \frac{\partial m_A}{\partial x} + W_A$, ou ainda:

Equação 4.25

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \frac{\partial m_A}{\partial x} = W_A$$

Na forma vetorial, a Equação 4.25 escreve-se:

Equação 4.26

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \nabla \cdot m_A = W_A$$

Porém, da Equação 4.22 tem-se:

Equação 4.27

$$\nabla \cdot \bar{m}_A = \nabla \cdot (\rho_A \bar{v} - \rho^* D_{AB}^* \nabla y_A)$$

Aplicando a Equação 4.27 na Equação 4.26

Equação 4.28

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_A \bar{v}) = \nabla \cdot (\rho^* D_{AB} * \nabla y_A) + W_A$$

Termo	Termo	Termo Difusivo	Termo
Transiente	Convectivo		fonte

O termo Transiente representa a variação da espécie "A" sofrida ao longo do tempo, enquanto que os termos convectivos e difusivos tratam do transporte de massa. A convecção representa o transporte de massa gerado pela velocidade média no meio reacional, enquanto que o termo difusivo é governado pela Lei de Fick, representando a difusão de espécies devida a diferença de concentrações (gradiente de concentrações). O termo fonte representa a quantidade de "A" gerada durante a reação química.

Considerando os princípios de cinética química e o modelo de Arrhenius, matematicamente o termo fonte pode ser escrito da seguinte forma:

Equação 4.29

$$W_A = \frac{d[A]}{dt} = K [A]^a [B]^b = k \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}} [A]^a [B]^b$$

Considerando uma mistura binária de A e B, quando a espécie A difunde, esta difusão ocorre contra outra espécie (espécie "B"). Desta forma, quando A difunde em B, B também difunde em A. Desta forma, a Equação 4.28 deverá ser reescrita como um sistema de equações:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_A \bar{v}) = \nabla \cdot (\rho^* D_{AB} * \nabla y_A) + W_A \\ + & \frac{\partial \rho_B}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_B \bar{v}) = \nabla \cdot (\rho^* D_{AB} * \nabla y_B) + W_B \\ \hline & \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0 + 0 \end{aligned}$$

A equação obtida da "solução" deste sistema é a equação da continuidade para o fluido ou mistura (assumindo que $\rho = \rho_A + \rho_B = \rho_{MISTURA}$). Faz-se necessário ressaltar que esta

equação não difere muito da equação de continuidade proposta para sistema não-reativo (Equação 3.7).

Equação de Continuidade para sistemas reativos:

Equação 4.30

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \bar{v})$$

Quando aplicada ao fenômeno do BLEVE, as espécies A e B tratam, em geral, da espécie combustível (A) e dos oxidantes do ar (B).

Alterando de base mássica para molar, a Equação 4.28 escreve-se:

Equação 4.31

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \nabla \cdot (C_A \bar{v}^*) = \nabla \cdot (C_A D_{AB} \nabla x_A) + \Omega_A$$

Onde: Ω_A : Taxa molar volumétrica de geração de A.

Apesar de não ser relevante para a análise de BLEVE, não pode ser excluído deste trabalho a forma geral para “i-componentes” da Equação 4.28:

Equação 4.32

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i \bar{v}^*) = \nabla \cdot (\rho^* D^* \nabla y_i) + W_i$$

Acoplando as equações derivadas da Lei de Fick com as equações fundamentais, tem-se um novo sistema de equações que pode ser aplicado à sistemas reativos. A abordagem mais comumente aceita para um sistema reativo (reação de combustão) é a abordagem de chama difusiva laminar.

4.5.5 Estabelecimento da Função de Chama

O exemplo mais simples de chama difusiva laminar é uma vela, conforme já apresentado na seção 4.1.3. Dentre as características de uma chama difusiva é o fato de as moléculas de oxidante e combustível não estarem inicialmente misturadas. Esta característica é percebida

no BLEVE, onde o combustível encontra-se confinado no interior do tanque e o comburente é o ar que circunda o tanque.

Em uma chama difusiva (Figura 4-6) a mistura inflamável é obtida através da difusão das espécies combustíveis e comburentes entre estas. Assumindo as espécies estejam em temperaturas iguais ou superiores a temperatura de ignição, a reação de combustão (causadora da chama) ocorrerá atendendo a estequiometria da reação.

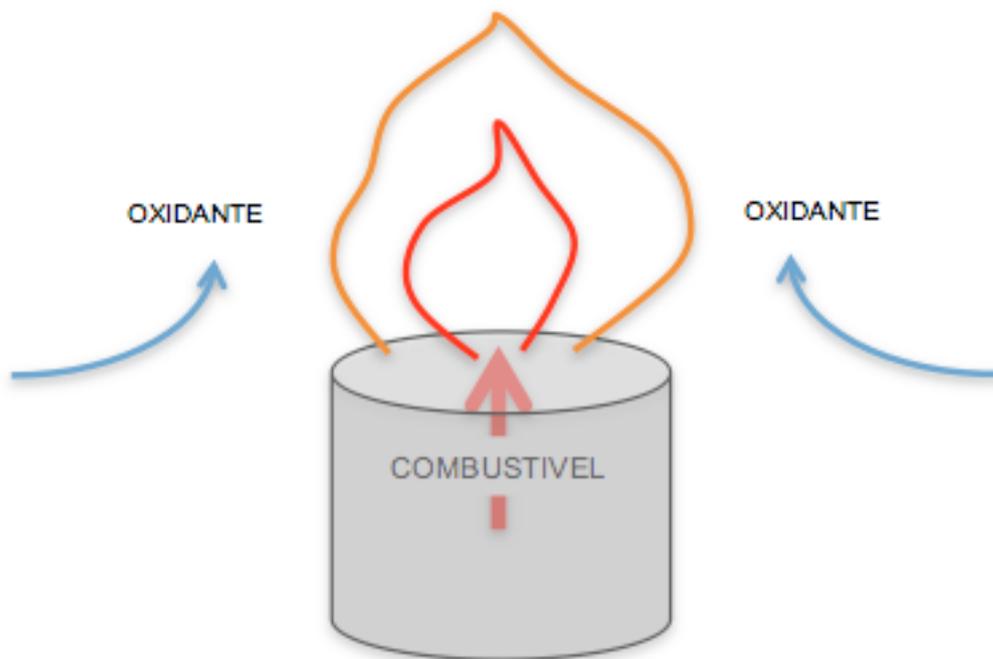


Figura 4-6 Modelo de vela para chama difusiva

Expandindo o entendimento da chama difusiva de uma vela para uma gota de combustível no ar (evento semelhante a combustão de cada partícula em um BLEVE). A Figura 4-7 representa o modelo

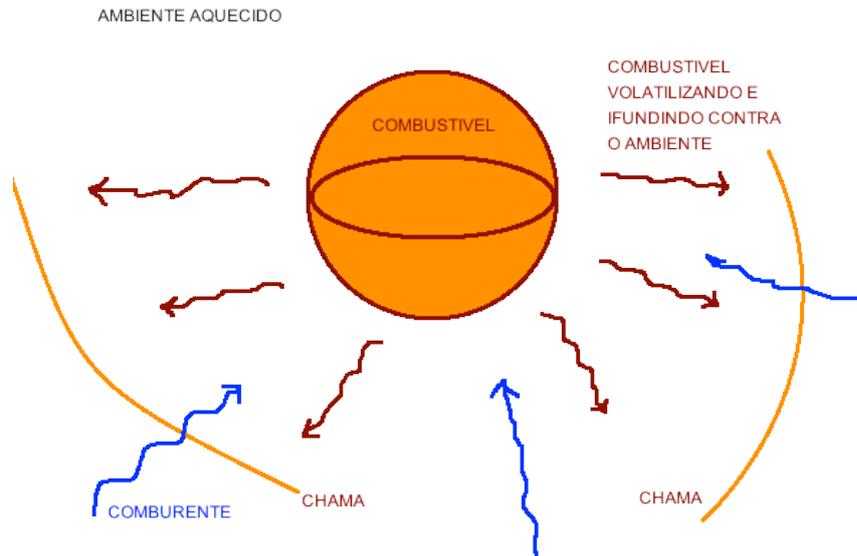


Figura 4-7 Gota de combustível imersa em ar (aquecido)

Observando a gota representada na Figura 4-7 pode-se concluir que para que ocorra reação química de combustão, o combustível da gota deve volatilizar-se e difundir-se “contra” o ar que a cerca (comburente). Esta difusão ocorre seguindo o gradiente de concentrações, que pode ser representado pelo gráfico da Figura 4-8.

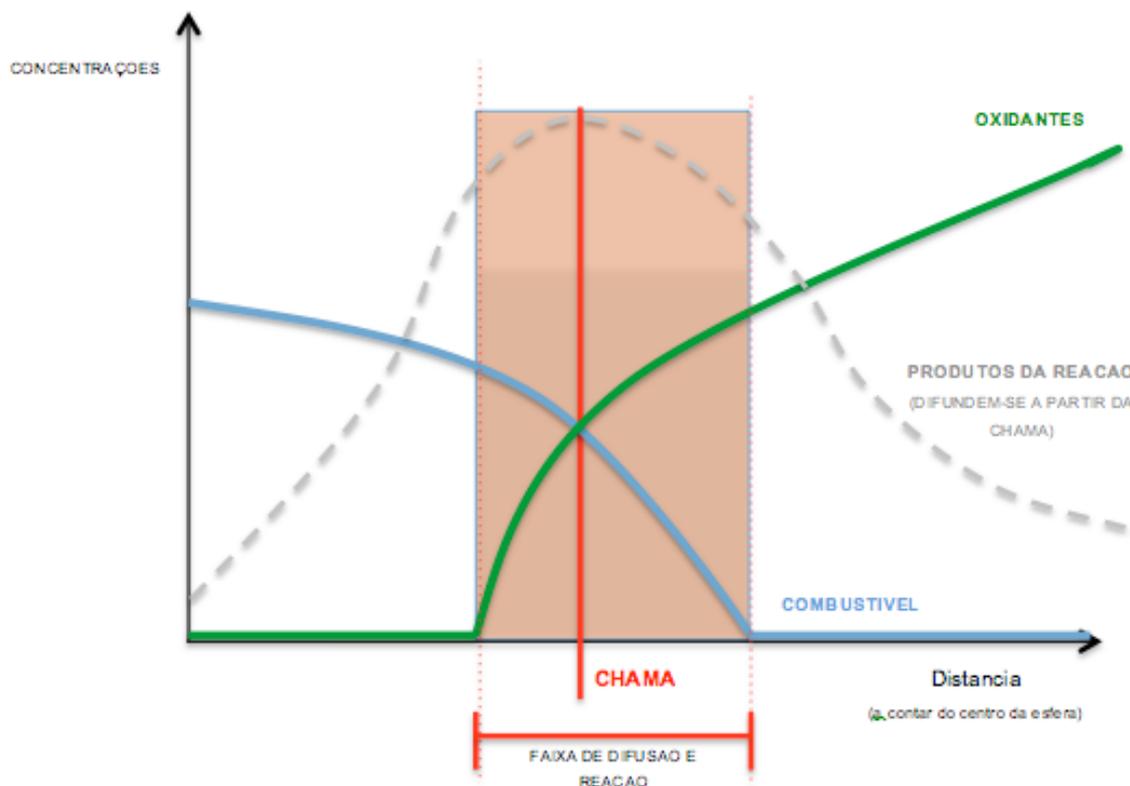


Figura 4-8 Difusão das espécies e região de chama

Analisando a Figura 4-8, percebe-se que a região de reação será àquela onde existem ambos os reagentes (combustível e comburente), ficando esta destacada na figura como “Faixa de difusão e reação”. Dentro desta região existe o ápice da reação química, que se localiza no ponto em que a reação ocorre segundo a sua estequiometria (quantidades proporcionais de combustível e comburente se equivalem). A este ponto chama-se chama.

Quando se aplica este conceito ao BLEVE, a chama confunde-se com a própria fronteira do sistema (bola de fogo). A modelagem da chama depende, intimamente, das geometrias envolvidas. Geometrias estas que afetam as condições iniciais e de contorno do problema matemático (equações diferenciais).

De forma a analisar, preliminarmente, as equações de formação de chama, é usado o modelo de Burke e Schulman (KUO 1986; FORTUNA 2000; MALISKA 2004; TANNEHILL, 1997; MORAN 1996), que apesar de ter sido derivado em coordenadas cartesianas permite modelar fenômenos reativos semelhantes ao BLEVE. Neste modelo os combustíveis usados são gases com fluxo no centro enquanto que os oxidantes também se apresentam em fluxo, ao lado do combustível.

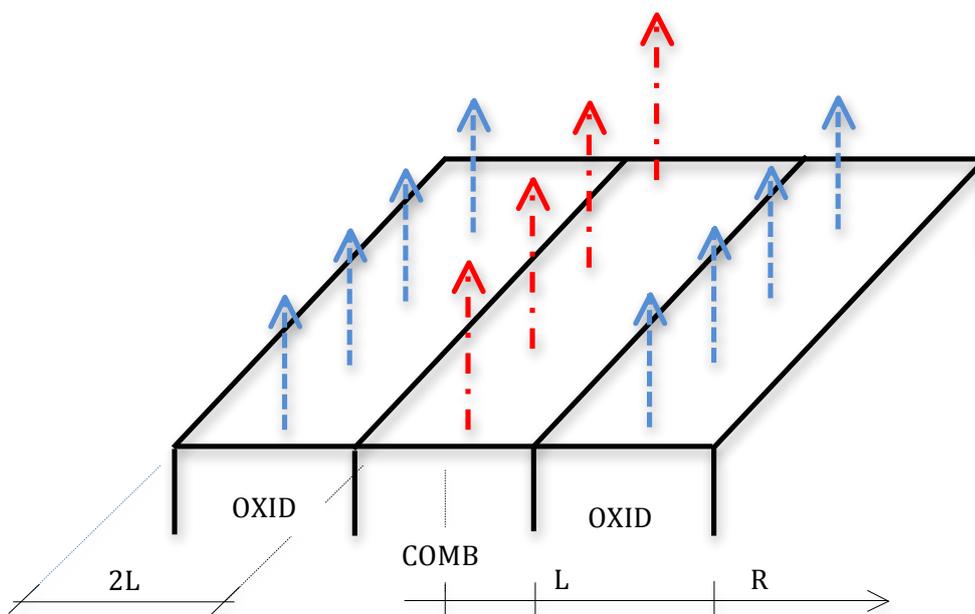


Figura 4-9 Modelo de queimador de Burke e Schulman

A modelagem matemática para o queimador de Burke e Schulman vale somente para o seguinte conjunto de hipóteses:

- Análise somente em duas dimensões
- Regime permanente
- Velocidades dos fluxos são constantes em toda a seção
- O coeficiente de difusividade é constante ($D_y = \text{cte}$)
- O termo $D_y \frac{\partial^2 y_i}{\partial y^2} \approx 0$
- Velocidades externas nulas (sem termo convectivo, $U=0$)

Neste contexto, a equação de conservação de espécies, em duas dimensões, toma a seguinte forma:

Equação 4.33

$$\rho u \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_i}{\rho} \right) + \rho v \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{C_i}{\rho} \right) - D_{ij} \rho \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{C_i}{\rho} \right) - D_{ij} \rho \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\frac{C_i}{\rho} \right) + \dot{W}^* = 0$$

Dividindo-se a **Equação 4.33** por $\rho^* M$, tem-se a equação de conservação de espécies desejada:

Equação 4.34

$$u \frac{\partial Y_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_i}{\partial y} - D_{ij} \left[\frac{\partial^2 Y_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y_i}{\partial y^2} \right] + Y_i^* = 0$$

Aplicando-se na **Equação 4.34** todas as hipóteses simplificadoras elencadas, esta equação pode ser escrita da seguinte forma:

Sistema de Equação 4.35

$$\left[\begin{array}{ll} v \frac{\partial Y_f}{\partial y} - D_{ij} \frac{\partial^2 Y_f}{\partial x^2} + Y_f^* = 0 & \text{(f=fuel) (combustível) Eq.(a)} \\ v \frac{\partial Y_o}{\partial y} - D_{ij} \frac{\partial^2 Y_o}{\partial x^2} + Y_o^* = 0 & \text{(o=oxidante) Eq. (b)} \end{array} \right.$$

Aplicando o conceito de reação química estequiometricamente equilibrada, e aplicando-se o princípio de Lavoisier, pode-se escrever:

1 kg Combustível + I kg Oxidante → (1+I) kg de produtos

Sendo “I” a quantidade estequiométrica de oxidante requerida para combustão completa.

Desta forma, entende-se que para reagir 01 kg de combustível, os fluxos devem comportar-se seguindo a seguinte proporção:

Equação 4.36

$$Y_f^* = \frac{Y_o^*}{I}$$

Aplicando a proporção apresentada pela **Equação 4.36** as sub-equações (a) e (b) do **Sistema de Equação 4.35**, opera-se:

$$(a) - \frac{(b)}{I}$$

Onde se obtém:
$$v \frac{\partial}{\partial y} \left(Y_f - \frac{Y_o}{I} \right) - D_{ij} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(Y_f - \frac{Y_o}{I} \right) + \left(Y_f^* - \frac{Y_o^*}{I} \right) = 0$$

Que, com a aplicação da **Equação 4.36**, passa a ser escrita:

Equação 4.37

$$v \frac{\partial}{\partial y} \left(Y_f - \frac{Y_o}{I} \right) - D_{ij} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(Y_f - \frac{Y_o}{I} \right) = 0$$

À semelhança do que foi feito para as equações de energia livre de Gibbs e Heinholts (CASTELAN, 1987), que são propriedades de um sistema criadas através de operações matemáticas de outras propriedades conservativas, o mesmo deve ser feito para o sistema reativo, estabelecendo-se:

Equação 4.38

$$\Phi = Y_f - \frac{Y_o}{I}$$

Ressalta-se que a função de chama da **Equação 4.38** ignora a difusão dos produtos de reação. Esta “negligencia” introduz, deliberadamente, um desvio entre o modelo

computacional e o evento físico. Contudo, está é a modelagem apresentada por KUO (1986) e demais autores.

Desta forma, a **Equação 4.37** escreve-se:

Equação 4.39

$$v \frac{\partial \Phi}{\partial y} - D_{ij} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = 0$$

Esta nova propriedade conservativa do sistema reativo possibilita mapear a posição da chama. A chama localizar-se-á no momento que todos os combustíveis e oxidantes tenham sido consumidos. Ou seja, a chama estará posicionada quando:

$$\Phi = 0 \quad (Y_f = Y_o = 0)$$

E as condições de contorno e inicial do queimador de Burke e Schulman para Φ são:

$$x=0 \quad \rightarrow \quad \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 \quad (\text{condição de simetria})$$

$$x=R \quad \rightarrow \quad \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 \quad (\text{hipótese de sistema enclausurado})$$

$$y=0 \quad \rightarrow \quad \Phi = \varphi_0, \quad \varphi_0 = \begin{cases} y_{f,o}, 0 \leq x \leq L \\ \frac{y_{o,0}}{I}, L < x \leq R \end{cases}$$

Graficamente, a condição inicial φ_0 para o queimador de Burke e Schulman é como apresentado na Figura 4-10

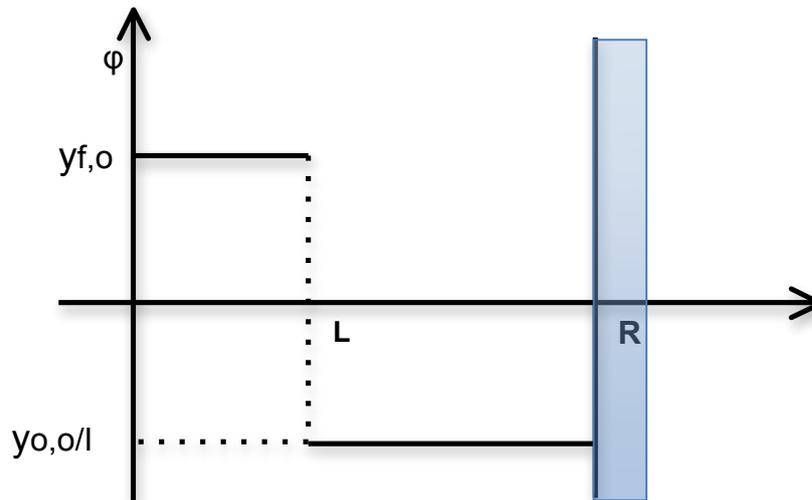


Figura 4-10 Condições de contorno para φ_0

Dentre as diversas técnicas matemáticas existentes para solucionar a **Equação 4.39**, a escolhida para as discussões na presente dissertação foi a da separação de variáveis. Desta forma, assume-se que a função de chama (Φ) pode ser escrita da seguinte forma:

Equação 4.40

$$\Phi(x, y) = Y(y) * X(x)$$

Derivando-se parcialmente a função de chama (Φ) apresentada na **Equação 4.40** tem-se:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = Y(y) \frac{dX}{dx} \quad \text{e} \quad \frac{\partial \Phi}{\partial y} = X(x) \frac{dY}{dy}$$

Aplicando-se estes resultados para as derivadas parciais da função chama na **Equação 4.39**, esta se reescreve da seguinte forma:

Equação 4.41

$$v * X(x) \frac{dY}{dy} - D * Y(y) \frac{d^2 X}{dx^2} = 0$$

A **Equação 4.41** pode ser reorganizada, possibilitando as soluções do sistema.

Equação 4.42

$$\frac{Y'(y)}{Y(y)} = \frac{D}{v} \frac{X''(x)}{X(x)} = -\lambda^2$$

Onde: $Y'(y) = \frac{dY}{dy}$ e $X''(x) = \frac{d^2X}{dx^2}$

A partir da **Equação 4.42** as soluções podem ser obtidas usando-se tabelas e resultados disponíveis na literatura (KUO 1986; FORTUNA 2000; MALISKA 2004; TANNEHILL, 1997; MORAN 1996), uma vez que resolver equações diferenciais não é objetivo desta dissertação, cujo foco é a análise de riscos.

Tratando a componente no eixo das ordenadas ($Y(y)$), a **Equação 4.42** resume-se

a $\frac{Y'(y)}{Y(y)} = -\lambda^2$, cuja solução é:

$$Y(y) = C_1 \exp(-\lambda^2 y)$$

Analisando a equação para o eixo das abscissas ($X(x)$), a **Equação 4.42** resume-se

a $\frac{D X''(x)}{v X(x)} = -\lambda^2$, que se desdobra para:

$$X''(x) + \lambda^2 \frac{v}{D} X(x) = 0$$

Cuja solução é:

$$X(x) = A_1 \text{sen}(bx) + B_1 \cos(bx), b^2 = \lambda^2 \frac{v}{D}$$

Aplicando o estabelecido na **Equação 4.40** e as soluções parciais apresentadas para as equações em x e y , a função de chama tem a seguinte solução:

Equação 4.43

$$\Phi(x, y) = C_1 e^{-\lambda^2 y} [A_1 \text{sen}(bx) + B_1 \cos(bx)]$$

Onde: $b^2 = \lambda^2 \frac{v}{D}$

A_1, B_1, C_1 São constantes

Os valores das constantes A_1, B_1, C_1 são determinadas através das condições de contorno e inicial para o problema.

Em resumo, o fenômeno físico pode ser modelado a partir das equações fundamentais. Estas equações fundamentais são todas equações diferenciais parciais (EDP) sem solução analítica e interdependentes. Assim sendo, a solução do problema passa pela discretização das equações e estabelecimento de malhas computacionais (técnica dos elementos finitos, por exemplo) (KUO 1986; FORTUNA 2000; MALISKA 2004; TANNEHILL, 1997; MORAN 1996). Estas soluções numéricas aplicam-se somente para o conjunto de condições inicial e de contorno implementadas, bem como para àquele específico conjunto de hipóteses simplificadoras.

Ressalta-se que a implementação das técnicas numéricas representa custos computacionais elevados e longos tempos para se obter os campos e vetores resposta desejados.

5 DISCUSSÃO DAS HIPÓTESES EM MODELOS FISICOS PARA ANÁLISE DE SEVERIDADE

A modelagem matemática derivada das equações fundamentais elaborada no Capítulo 4 da presente dissertação gera resultados cuja adesão ao evento real é diretamente relacionada com a adequação das hipóteses adotadas e condições de contorno estabelecidas.

5.1 EQUAÇÕES DE ESTADO: IMPACTO DAS HIPÓTESES

A **Equação 4.10** é a equação que leva a temperatura como um parâmetro para o dentro do sistema de equações. A temperatura aparece de modo não-linear neste sistema, tornando sua modelagem um ponto crítico. Ainda mais complexo é o fato de o calor específico também ser dependente da temperatura em uma base não-linear.

Devido às complexidades matemáticas envolvidas, resolver este sistema implica em esforços computacionais intensos, tanto escrever o código, como em recursos computacionais para implementar a solução. Contudo a solução, quando implementada, oferece resultados detalhados dos campos de temperatura e velocidades (matematicamente escrito como vetor).

Quanto a precisão dos resultados, esta depende das hipóteses adotadas por ocasião das modelagens matemáticas.

5.1.1 Ausência de Influências Externas

No ambiente real, sempre há forças externas que podem influenciar um incêndio ou explosão, como a eólica. O vento é a força externa ao evento mais comum e importante quando se discute qualquer modelagem que utiliza equações fundamentais.

As equações fundamentais formam um sistema de equações que podem ser resolvidos a fim de determinar a temperatura, concentração e campos de velocidade ao longo do tempo. Devido à natureza de um BLEVE, nos instantes antes do evento, há zero de combustível fora dos cilindros e zero agentes oxidante dentro dela. Uma vez que a explosão ocorre

mecânica, o combustível se dissipa no ar, elevando o teor de combustíveis na mistura até atingir a faixa de inflamabilidade. Quando isso acontece, a segunda fase (bola de fogo) tem início. Durante a segunda fase, além da difusão do combustível no ar, ocorrem também os fenômenos de troca térmica, principalmente a convecção de calor.

Ambas as difusão de massa e convecção podem (e irão) sofrer interferência do vento ou de qualquer outro campo de velocidade. No entanto, em outros o modelo de evento de difusão de massa (e outros movimentos de espécies químicas) leva em conta a pressão dentro do cilindro como a única força diretora. Como consequência, a forma externa da bola de fogo tende a assemelhar-se a forma externa do cilindro de gás (combustível) na sua origem, em direção a uma esfera com o passar do tempo.

5.1.2 Fluido Incompressível

Devido a magnitude das pressões envolvidas durante um evento BLEVE, os fluidos (ar e combustíveis) comportam-se de forma compressível. A intensidade da pressão durante a fase de explosão mecânica (ruptura do cilindro) é significativamente grande para exigir que a modelagem matemática leve em conta este efeito. No entanto, o nível de complexidade aumentaria sobremaneira os tempos computacionais necessários para executar o algoritmo, bem como tornaria complexo o uso da equação da continuidade como um dos critérios para assegurar a convergência dos cálculos.

Portanto, usualmente o fluido é considerado incompressível para garantir um modelo razoavelmente simples, tanto matemática e computacionalmente. Contudo, a relevância da característica compressível do líquido diminui como o ponto de observação se afasta do cilindro, o que eleva o grau de adesão entre o modelo e os fenômenos quando mais distante coloca-se o observador

5.1.3 Problemas com Temperatura

A temperatura é o maior dos problema na modelagem de um BLEVE, devido a grande quantidade de efeitos e inter-relações que devem ser considerados.

A temperatura afeta a transferência de calor por convecção, devido a influência desta (temperatura) sobre os campos de velocidade. A temperatura afeta também os efeitos da difusão de massa, que dependente da temperatura. Para permitir que algum nível de discussão, enfoca-se nesta seção a questão da temperatura observando-se apenas a **Equação 4.10**:

Equação 4.10:

$$\frac{dT}{dt} = -\alpha \cdot \nabla^2 T + k \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}} \cdot C_p(T) \cdot dT$$

O lado esquerdo da **Equação 4.10** representa a variação dos campos de temperatura ao longo do tempo, enquanto o lado direito representa a variação da temperatura através do espaço e da fonte de temperatura.

Se o termo-fonte ($k \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}} \cdot C_p(T) \cdot dT$) fosse inexistente, a equação seria relativamente simples de resolver, utilizando a técnica de elementos finitos. No entanto, esse não é o caso. Na verdade, o termo-fonte é o núcleo do BLEVE (epicentro da bola de fogo).

O termo fonte na **Equação 4.10** representa o calor da reação química, modelada utilizando-se equação de Arrhenius e a entalpia desta (reação químicas). Ambos são não-linearmente dependentes com a temperatura.

A maneira mais simples de abordar essa não-linearidade é devida à reação química ocorrerá de imediato e consumindo 100% dos reagentes. Por este pressuposto, toda a energia disponível na reação química (entalpia de combustão) seria liberada imediatamente. Isso introduz um desvio entre o modelo e o evento real quando se refere à temperatura armazenada, de difusão de massa (antes da reação há apenas reagentes e um instante depois, há apenas produtos) e velocidade. No entanto, o desvio introduzido por essa hipótese não é tão significativo considerando que a reação química não ocorre seguindo um rendimento de 100%, ou outro número pré-definido.

No caso da introdução do fator de produção para a combustão na equação, a variável seria outro multiplicador para o termo fonte. No entanto, o fator de produtividade seria pré-definido e não combinam perfeitamente ao evento real.

Os problemas de modelagem, quando se trata da cinética química, estão relacionados

principalmente com a precisão e exatidão dos resultados, quando comparados e contrastados com o evento real. Este não é exatamente o caso quando se lida com a entalpia, ou mais precisamente, com o calor específico.

O calor específico depende da temperatura, o que significa que para qualquer temperatura o calor específico irá assumir um valor diferente. Isto é agravado pelo fato de a taxa na qual o calor específico variar em função da temperatura não pode ser modelado por uma regressão polinomial constante para qualquer dada faixa de temperatura.

Portanto, quando a **Equação 4.10** (ou o sistema de equações), deve ser resolvido, o integrante do termo fonte assumirá uma correlação diferente para o calor específico para pequenos intervalos de temperatura.

Como resultado, há uma diminuição no rigor e precisão, bem como um aumento do esforço computacional. Se os requisitos de precisão não são rigorosos, é possível supor que o calor específico possa ser aproximado através de uma correlação polinomial, por exemplo. Esta correlação polinomial pode ser, por exemplo, linear da forma:

$$C = C(t) = a T + b,$$

Onde a e b serão determinados para qualquer faixa específica de temperatura. Esta medida permitirá que os cálculos simples ao custo de precisão e exatidão

5.1.4 Hipóteses de Chama

A difusão das espécies combustível e comburente em uma gota de combustível foi apresentada na Figura 4-8, reinserida nesta seção sob a referência Figura 5-1. Este perfil de difusão de espécies possibilita orientar a posição da chama.

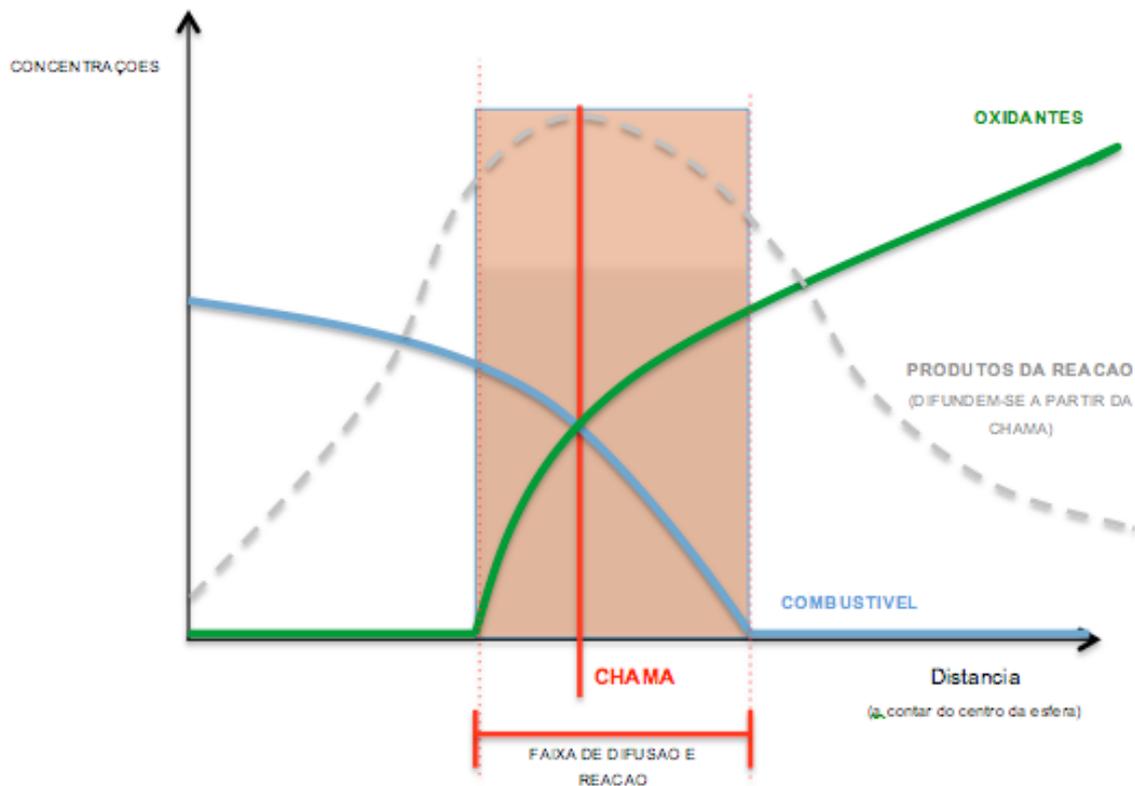


Figura 5-1 Perfil da difusão de espécies

Segundo a modelagem matemática adotada no capítulo 4 desta dissertação, a chama localiza-se no ponto em que as estequiometrias se equivalem, ou seja:

Equação 4.38

$$\Phi = Y_f - \frac{Y_o}{I}$$

E a função Φ será igual a zero

Contudo, este modelo simplifica os fenômenos reais. No evento real, a chama não se resume a apenas uma “linha” onde a estequiometria é atendida, mas na verdade a chama é uma região de chama. A reação química de combustão pode ocorrer desde a fronteira da gota de combustível (limite onde o comburente tem concentração nula) até esgotamento do combustível (fronteira onde a concentração do combustível é nula), perfazendo a região de difusão e reação; que pode ser observada na Figura 5-1

Esta região de chama real é ainda mais dissociada do modelo proposto para a função de chama (**Equação 4.38**) uma vez que a difusão de produtos de combustão através da chama e seguindo escoamento turbulento não é considerado.

5.2 BOLA DE FOGO: LIMITAÇÕES DE MODELAGEM

A modelagem da Bola de fogo também representa um problema a ser considerado. Conforme discutido por BUBBICO (2008) a bola de fogo origina-se da liberação catastrófica de uma quantidade significativa de líquido inflamável a partir da origem, após ignição, para um incêndio específico (bola de fogo). Dentre as consequências da bola de fogo, ressalta-se como principal a liberação (geração) de radiação térmica. Basicamente, à semelhança com outros fenômenos de fogo, duas abordagens para o cálculo das suas consequências estão disponíveis na literatura: o modelo de fonte pontual e o modelo chama finita.

No primeiro caso (fonte pontual), presume-se que uma fração (R) do total de calor de combustão é emitido uniformemente em todas as direções como radiação de um único ponto no centro da chama. O fluxo de radiação (E_p , [W/m²]) mensurado a uma distância (m) a partir do centro da chama pode ser calculado pela **Equação 5.1**:

Equação 5.1

$$E_p = \frac{Rm \cdot \Delta H_c \tau}{4\pi x_p^2}$$

Onde: m é a taxa de combustão (kg / s),
 H_c o calor de combustão compor unidade de massa (J / kg) e
 τ É a transmissividade do ar (adimensional).

Alternativamente, de acordo com o modelo chama finita, o fluxo de radiação recebida (E_s), em uma dada distância da superfície do fogo, que neste caso é aproximada por uma esfera, é dado pela **Equação 5.2**:

Equação 5.2

$$E_s = E\tau F$$

Onde: F é o fator de visão geométrica entre o emissor e receptor de superfícies, e
 E é o poder que a radiação emitida por unidade de superfície do fogo (W/m²)

Equação 5.3

$$E = \frac{Rm_f \Delta H_c}{\pi D_{\max}^2 t_c}$$

Onde m_f é a massa inicial de combustível (kg),
 D_{\max} é o diâmetro máximo da bola de fogo (m) e
 t_c a duração de combustão (s).

A aplicação da **Equação 5.2** e da **Equação 5.3**, requerem o conhecimento da geometria e outros parâmetros específicos do fogo (tamanho, altura, duração, etc.) Diferentes modelos de cálculo são possíveis, mas a maioria deles tem a mesma forma, sendo a diferença apenas nos valores das constantes numéricas.

Desta forma, percebe-se que a modelagem do contorno da bola de fogo introduz complicadores numéricos ao sistema de equações, incrementando os desvios entre computacional e real.

6 DISCUSSÃO DAS ANÁLISES DE RISCO AMBIENTAIS

O BLEVE é um representante de eventos complexos, sob o ponto de vista físico. Do ponto de vista da segurança, o BLEVE é um evento significativo e com elevados potenciais de causar dano. Desta forma, o BLEVE é passível de sofrer uma análise de seus riscos.

Analisar e gerenciar os riscos em eventos complexos (tais como Bleve) não é tarefa simples ou óbvia, dependendo diretamente dos aspectos do risco e do cenário em questão. A Figura 6-1 apresenta um fluxograma global para esta tarefa.

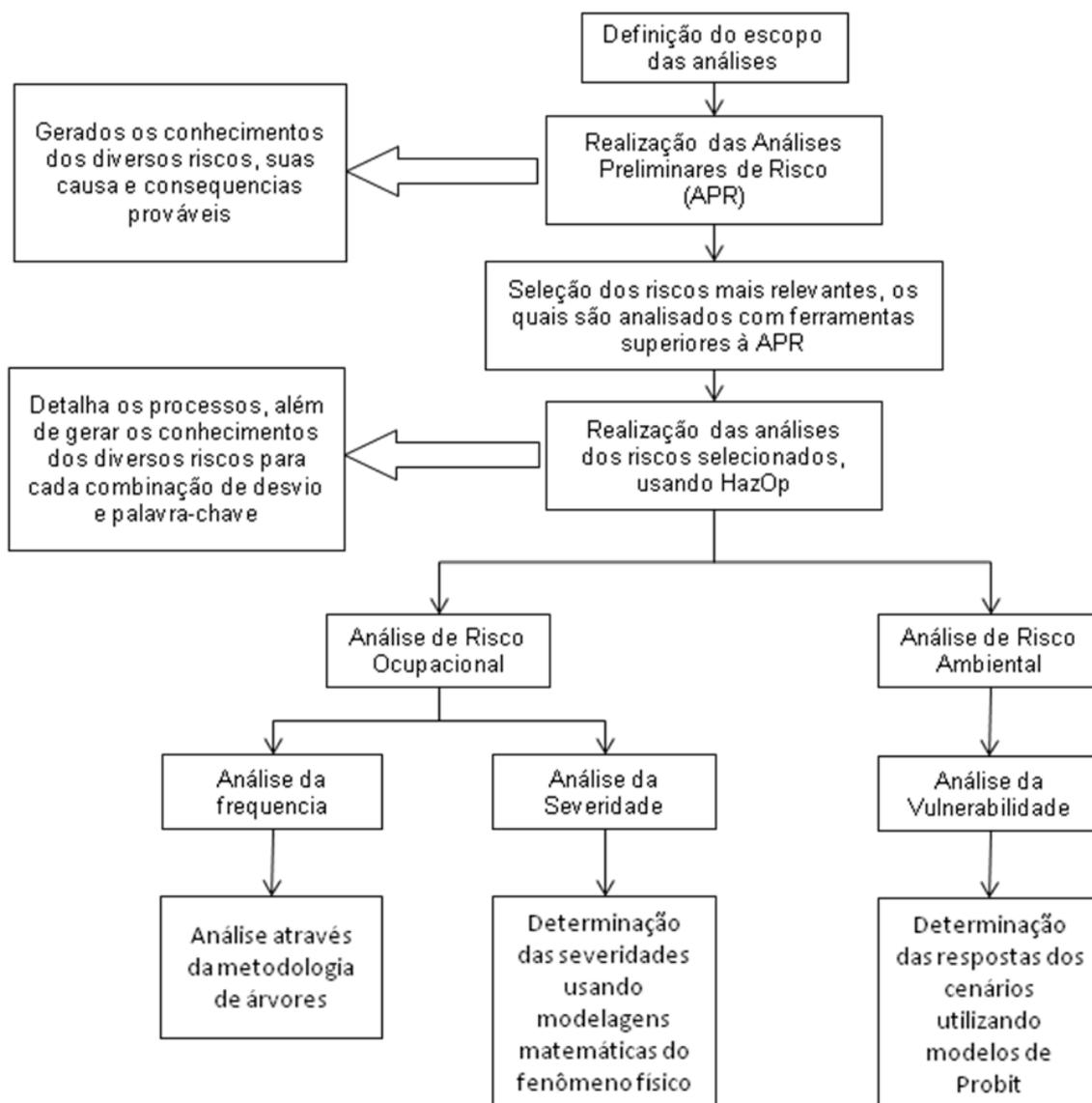


Figura 6-1 Processo de análise e avaliação dos riscos para um BLEVE

A abordagem preliminar para analisar e avaliar os riscos de um BLEVE é estudar a fonte dos riscos. No caso de BLEVE, esta fonte se caracteriza pelo cilindro contendo o combustível e as vizinhanças imediatas. Esta análise preliminar objetiva estabelecer os contextos no qual esta fonte está inserida, bem como entender suas características. Neste caso, uma técnica de análise de risco do tipo planilha é indicada, sobressaindo-se a técnica da APR – Análise preliminar de riscos (ESTADOS UNIDOS, MIL-STD 882D, 2001).

Os resultados obtidos pela APR indicam quais as causas e consequências prováveis de um acidente envolvendo a fonte dos riscos, incluindo quais são as prováveis causas para um BLEVE.

Na sequência do processo de gestão dos riscos, os conhecimentos obtidos através da APR podem ser usados para base para análises de riscos com maiores graus de complexidade. Devido a natureza intrínseca da fonte dos riscos (cilindro contendo combustível) assemelham-se a instalações químicas de processo, o HazOp (CPR 12E, 1997; DUNJÓ et al, 2010) destaca-se dentre todas as ferramentas de análise de riscos disponíveis.

O HazOp (CPR 12E, 1997; DUNJÓ et al, 2010) apesar de ainda apresentar resultados qualitativos, apresenta resultados detalhados das causas e consequências de falhas em cada equipamento, válvula, junção e demais componentes do sistema no qual o cilindro de combustíveis está inserido.

Neste momento, o gestor de riscos já dispõe de dados suficientes sobre causas e consequências envolvendo o cilindro de combustíveis para decidir e implementar medidas mitigadoras. Contudo, estes resultados ainda são de natureza qualitativa e focados na análise da fonte do risco.

Estes resultados qualitativos podem ser desdobrados em resultados específicos e quantitativos. Para tal, as “causas” e “consequências” (efeitos) devem ser tratadas independentemente.

As “causas” podem ser estudadas valendo-se das ferramentas do tipo “árvore”. Os resultados obtidos nas APR’s e no HazOp são utilizadas para definir quais hipóteses de acidentes devem ser consideradas, e para cada hipótese constrói-se uma “árvore”. Se as

análises preliminares e do HazOp (CPR 12E, 1997; DUNJÓ et al, 2010) foram elaboradas corretamente, a hipótese de um BLEVE foi considerada.

Inicialmente esta “árvore” desenvolve-se se estabelecendo a sucessão de causas que conduzem à materialização da hipótese de acidente considerada. Neste caso, BLEVE. Findada a construção das várias árvores de causas e efeitos, estas podem ser analisadas. Desta análise, definir-se-ão quais modelam as cadeias de eventos de hipóteses acidentais relevantes (dentre as quais o BLEVE deve ser incluído).

A estas árvores será, então, desdobrada a análise de causas qualitativa para quantitativa. Este processo ocorre determinando, definindo e arbitrando as probabilidades de ocorrência de cada causa base nas árvores. Quando para todas as causas base já se encontram definidos os valores de probabilidade, a árvore de causas pode ser calculada e um valor para a probabilidade de ocorrência da hipótese acidental determinado.

Neste momento, já é possível apresentar um valor de probabilidade para a ocorrência de cada hipótese acidental relacionada nas análises de planilha. Probabilidade esta que se relaciona com a variável “**frequência**” do risco. Resta ainda decidir modelar a “**severidade**” de cada hipótese acidental.

As hipóteses acidentais podem ou não ter a severidade modelada. Dependendo das relevâncias destas hipóteses acidentais, os resultados das análises de planilha e árvore podem ser suficientes para permitir ao gestor de riscos implementar medidas mitigadoras e de controle necessárias.

Contudo, caso a **severidade** seja de interesse para o caso da hipótese acidental (BLEVE), a modelagem passa pelo cálculo efetivo do fenômeno físico. Este cálculo passa pela solução dos sistemas de equações apresentado no capítulo 4, respeitando-se as limitações discutidas no capítulo 5 e determinando o grau de exatidão e precisão são necessários com antecedência. A partir dessa informação, é possível decidir que hipótese usar e como próximo ao evento real serão os resultados da simulação.

Negligenciar os aspectos geométricos (que significa assumir um cilindro como uma esfera), por exemplo, permite alcançar resultados relacionados ao evento real em uma área aberta, mas dificilmente em qualquer espaço confinado. O mesmo vale para as condições de vento.

Ao negligenciar os aspectos reação química (como discutido na seção 5.1), é possível conseguir resultados para o campo de temperatura e área danificada pela bola de fogo maior do que o evento real. Esta abordagem poderá servir uma simulação com o objetivo de ser utilizado na avaliação de risco a um custo computacional relativamente baixo.

Contudo, os modelos derivados das equações fundamentais possibilitam ao simulador implementar soluções matemáticas que agregam ao sistema de equações componentes para modelar e acomodar simulações mais complexas, tais como um conjunto de condições iniciais que levem em consideração vento ou um domínio computacional com relevo específico. Entretanto estas implementações estão intimamente relacionadas com aumento do custo.

Ressalta-se que todas as análises de risco realizadas até este momento focam na fonte dos riscos.

Realizar análises de risco focadas somente na fonte deste (risco) pode ser suficiente para a gestão ocupacional, mas não atende aos preceitos das análises de risco ambientais. Os órgãos ambientais brasileiros, quanto impõe análises de risco aos empreendedores, desejam, em última análise, obter resultados de como ambiente externo ao empreendimento responderá às hipóteses de acidente.

Desta forma, e conforme exposto no capítulo 3, a análise esperada é uma análise de vulnerabilidade. Esta análise de **vulnerabilidade** deve determinar de modo direto e objetivo quais os impactos das hipóteses acidentais nos cenários circunvizinhos ao empreendimento.

Faz-se então necessário então determinar as hipóteses acidentais a serem modelados e quais ferramentas e procedimentos de modelagem serão aplicados.

A análise de vulnerabilidade é conceitualmente extremamente complexa, devido ao grande número de variáveis envolvidas: construções, distâncias, taxas de ocupação das áreas, entre outros.

Devido a isto, padrões e critérios devem ser aplicados. Analisar a vulnerabilidade, conforme proposto pelos diversos órgãos ambientais brasileiros, passa por aplicar os modelos de probit (Seção 3.3.3.1) para critérios pré-definidos e definir curvas de efeito, tendo o a fonte de risco como seu epicentro.

O modelo de probit não modela a vulnerabilidade completamente, focando somente no aspecto dos impactos da hipótese acidental considerada. Contudo, apesar de incompleta, as análises usando-se probit permitem estabelecer distâncias de segurança à fonte dos riscos para fins de ação de emergência, planos de evacuação ou mesmo zoneamento urbano.

7 CONCLUSÕES

Desta dissertação é possível concluir:

- [1.] Analisar e avaliar riscos é o exercício de conhecer os potenciais riscos em um processo, de sorte a possibilitar a implementação de medidas de controle e tomada de decisão.
- [2.] Conforme apresentado no capítulo 2, as análises e avaliações de risco podem ser realizadas de várias formas, conforme várias ferramentas e seguindo diferentes princípios. O tipo de resposta esperada da análise e o cenário apresentado comandarão a escolha do método.
- [3.] O cenário é um componente extremamente relevante para determinar a escolha do método de análise e avaliação de riscos, principalmente quando este “risco” é o chamado “Risco ambiental”, conforme discutido no capítulo 3, seção 3.1.
- [4.] Utilizar equações fundamentais para modelar uma hipótese acidental (BLEVE) aborda somente a componente da “severidade”, além de exigir equilíbrio entre precisão e rapidez. Maximizar um é minimizar o outro, conforme discutido nos capítulos 4 e 5.
- [5.] No campo das análises de vulnerabilidade as equações de Probit (seção 3.3.3.1) têm grande mérito, motivo pelo qual são os métodos de cálculo escolhidos pelos órgãos ambientais brasileiros. De implementação matemática mais simples, as equações de Probit já são modelos simplificados para tratar o evento físico real, não demandando conhecimentos sólidos da física, química e termodinâmica que regem o fenômeno ou mesmo de ferramentas matemáticas para tratar equações diferenciais parciais (equações fundamentais).
- [6.] Qualquer simulação presta-se para comparados e contrastados resultados, sempre se mantendo a(s) hipótese(s) como ancora e ponto de ligação entre o modelo e o evento real. Os modelos de Probit possibilitam traçar “fronteiras” de um sistema, enquanto que as equações fundamentais possibilitam gerar campos de temperatura,

velocidade, concentrações ou outras propriedades físicas de um sistema (BLEVE), conforme comentado no capítulo 6

Ao final desta dissertação, apresentam-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- [1.] Avançar nos estudos das diferenças entre severidade e vulnerabilidade.
- [2.] Definir um cenário contendo ambiente propício para ocorrência de BLEVE para então calcular a severidade deste usando as equações propostas nesta dissertação e a vulnerabilidade usando as equações de probit
- [3.] Para o mesmo cenário de BLEVE, determinar as vulnerabilidades usando-se o modelo de probit, diferindo os critérios considerados, ou seja, tomando padrões de referencia em mais de uma Norma ambiental. Comparar os resultados.
- [4.] Estabelecer diferentes cenários, eventos e riscos e refazer os estudos propostos para o BLEVE.

8 REFERÊNCIAS

ABBASI, T. and ABBASI, S.A. 2006. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management. Center for Pollution Control and Energy Technology, Pondicherry University, India

AKHAVAN J. The Chemistry of Explosives - 2nd Edition. Royal Military College of Science, Swindon.

AUSTRALIA. 2004. AS NZS 4360:2004: Risk Management. Australian and New Zealand Standards. ISBN 0 7337 5904 1

BAKER, W.E., COX, P.A., WESTINE, P.S., KULESZ, J.J., STREHLOW, R.A. 1983. Explosion Hazard and Evaluation, Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam. ISBN 0-444-42094-0.

BJERKETVEDT, D., BAKKLE, J.R., WINGERDEN, K.V. 1997. Gas Explosion Handbook. Elsevier, Journal of Hazardous Materials, Páginas 1-150.

BORYSIEWICZ, M.J., BORYSIEWICZ, M.A., GARANTY, I., KOZUBAL, A. Quantitative Risk Assessment, CoE MANHAZ, Institute of Atomic Energy, Polony.

BRASIL. 1978. Lei 6.514/77, regulamentada pela Portaria 3.214/78 – Norma Regulamentadora 23

BRASIL. 1981. Lei 6.938 de 31 de agosto de 1981 - Política Nacional de Meio Ambiente. Brasília, 1981.

BRASIL. 1986. *Resolução No 1, de 23/01/86, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)* - estabelece as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente.

BRASIL. 1997. *Resolução No 237, de 19/12/97, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)* - Procedimentos de Licenciamento Ambiental

BUBBICO, R.; MARCHINI, M. 2008. Assessment of an explosive LPG release accident: A Case study. *Journal of Hazardous Materials* 155, paginas 558-565. Roma. Italy. 2008.

CASAL, J.; J. ARNALDOS, H. MONTIEL, E. PLANAS-CUCHI, J.A. VILCHEZ, 2001. Modelling and understanding BLEVE, in: M. Fingas (Ed.), *Handbook of Hazardous Spills*, McGraw Hill, New York, 2001.

CASTELLAN, G.; 1987. *Físico-química*. Edited by Pearson Prentice Hall. 1987. ISBN 9684443161

CCPS. CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY OF THE AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. 1989. *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. New York: CCPS, 1989

CHEREMISINOFF, N.P. 2001. *Practical Guide to Industrial Safety – Methods for Process Safety Professionals*. Marcel Dekker Inc. New York. US. ISBN 0-8247-0476-2

CHU, G.Q., WANG, J.H. 2009. Stochastic Analysis on Probability of Fire Scenarios in Risk Assessment to Occupant Evacuation. *IEEEEM*. 2009.

CIANCEY, VJ, 1972. *Diagnostic Features of Explosion Damage*, 6th International Meeting on Forensic Sciences, Edinburgh, Scotland, 1972.

COLBOURNE, D. e SUEN, K.O. 2004. Appraising the flammability hazards of hydrocarbon refrigerants using quantitative risk assessment model Part I: modeling approach. University College London, Gower Street, London, UK, 2004

COPPER, P. W. 1996. *Explosives Engineering*. Wiley-VCH, United States of America. 1996. ISBN 0-471-18636-8.

CRIPPA, C. FIORENTINI, L., ROSSINI, V. STEFANELLI, R. TAFARO, S. e MARCHI, M. 2009. Fire risk management system for safe operation of large atmospheric storage tanks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*

CROCKER, W. P. e NAPIER, D. H. 2001. Assessment of mathematical models for fire and explosion hazards of liquefied petroleum gases. University of Toronto, Toronto, Canadá

CRIPPA, C., FIORENTINI, L., ROSSINI, V., STEFANELLI, R., TAFARO, S., e MARCHI, M. 2009. Fire risk management system for safe operation of large atmospheric storage tanks. Web of science. Journal of Loss Prevention in the Process Industries

DATE, P. LADE, R.J. MITRA, G. e MOORE, P.E. 2009. Modelling the risk of failure in explosion protection installations. Center for the Analysis of Risk and Optimization Modeling Applications (CARISMA), School of Information Systems, Computing and Mathematics, Brunel University, Middlesex UB8 3PH, UK

DAG BJERKETVEDT, JAN ROAR BAKKE AND KEES VAN WINGERDEN. 1998. Gas explosion handbook. Norway.

DEACON, T., AMYOTTE, P.R., KHAN, F.I. 2010. Human Error risk Analysis in Offshore Emergencies. Elsevier, Safety Science 48, pags 803-818.

DUNJÓ, J., FTHENAKIS, V., VÍLCHEZ, J.A., ARNALDOS, J. 2010. Hazard and Operability (HAZOP) Analysis: A literature review. Elsevier, Journal of Hazardous Matherials, 173, pgs 19-32.

EL-MAHALLAWY, FAWZY; HABIK, SAAD EL-DIN. 2008. Fundamentals and Technology of Combustion. ISBN 0-08-044089-4. ED. Elsevier. Oxford, UK. 2008.

ELLIS T. M. R., PHILIPS, IVOR R., LAHEY, THOMAS M. 2004. Programming Fortran 90. England. Addison-Wesley (ISBN 0-201-54446 6)

ESTADOS UNIDOS. 1997. Accident Prevention Manual – for Business &Industry, National Safety Council, EUA: Illinois

ESTADOS UNIDOS. 2001. MIL-STD-882D: Standard Practice for system safety. 2001.

ESTADOS UNIDOS. 2000. MIL-STD-1629: Standard: Failure Mode and Effect Analysis. 2000.

NFPA. 2002. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. National Fire Protection Association, - 3rd Edition. Quincy, Massachusetts. 2002. ISBN 087765-451-4,

ESTADOS UNIDOS. 1984. TM 9-1300-214 MILITARY EXPLOSIVES. 1984.

ESTADOS UNIDOS. 1984. Environmental Protection Agency (EPA). Quality Assurance Handbook for air - volume I – Principles. United States of America. 1984

ESTADOS UNIDOS. 1994. Environmental Protection Agency (EPA). Quality Assurance Handbook for air - volume II – Specific Methods. United States of America. 1994

ESTADOS UNIDOS. 1995. Environmental Protection Agency (EPA). Quality Assurance Handbook for air - volume III – Specific Methods. United States of America. 1995

ESTADOS UNIDOS. 1995. Environmental Protection Agency (EPA). Quality Assurance Handbook for air - volume IV – Measurements. United States of America. 1995

FAISAL I. KHAN AND S. A. ABBASI. 1999. MAXCRED – a new software package for rapid risk assessment in chemical process industries. Risk Assessment Division, Centre for Pollution Control & Bio-waste Energy, Pondicherry University, Índia

FORTUNA, A O. 2000. Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo. ISBN: 85-314-0526-2.

FOGLER, H. S.; 1992. Elements of Chemical Reaction Engineering. Prentice-Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences. 1992. ISBN 0-13-53708-8;

FRUTUOSO, P. F., 2001. *Análise de Confiabilidade e Análise Quantitativa de Risco – Curso de Avaliação e Gerenciamento de Riscos*, Instituto Politécnico da UFRJ, Eds Frutuoso, P. F e Faertes, D.

GAD, S.C. 1999. Product Safety Evaluation Handbook. Marcel Dekker Inc. Nova York. ISBN 0-8247-1971-9

GENOVA, B, SILVESTRINI, M; e TRUJILLO, E F.J. L. 2007. Evaluation of the blast-wave over pressure and fragments initial velocity for a BLEVE event via empirical correlations derived by a simplified model of released energy. Università degli Studi di Roma. Roma, Italy. 2007

GLASSMAN, IRVIN; YETTER, RICHARD A. 2008. Combustion - Fourth Edition. ISBN 978-0-12-088573-2. ED. Elsevier. Oxford, UK. 2008.

HAMMER, W. 1972. Handbook of System and Product Safety. Prentice-Hall. ISBN 0-13-382226-5.

HANEA, DANIELA, ALE, BEN. 2009. Risk of human fatality in building fires: A decision tool using Bayesian networks. Web of Science

HORI, S., OMORI, T., SAKAGAMI, M. 1996. Fault Diagnosis Device. United States Patent Number 5.587.930. 24 Dec 1996. US005587930A

HU, A.H., HSU, C., KUO, T., WU, W. 2009. Risk Evaluation of Green Components of Hazardous Substance using FMAE and FAHP. Elsevier. Journal of Expert Systems with Applications, 36. Pages 7142 – 7147.

IMURA, Y., KAJI, A., MARUYAMA, T. 1994. Fault Tree Displaying Method and Process Diagnosis Support System. United States Patent Number 5.369.756 29 Nov 1994. US005369756A

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. 2009. Risk Management – Principles and Guidelines. ISO 31000:2009, 2009

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. 2000. Sistemas de gestão da qualidade – Requisitos. NBR ISO 9001:2000, 2000

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. 2004. Sistemas da gestão ambiental - Requisitos com orientações para uso. ISO 14001:2004.

ISTVÁN BERTA. 2009. Use of soft computing methods in risk assessment of electrostatic fire and explosion hazards in industries. Budapest University of Technology and Economics,

JAFFEE A. SUARDIN, A. JEFF MCPHATE JR., ANTHONY SIPKEMA, MATT CHILDS AND M. SAM MANNAN. 2008. Fire and explosion assessment on oil and gas floating production storage off loading (FPSO): An effective screening and comparison tool.

KALLELA, J., VOLLMAR, G., SZÔKE, S. 2006. Method for the Automated Generation of Fault Tree structure. United States Patent Number 7.013.411 B2. 14 Mar 2006. US007013411B2.

KHAN, F.I., e ABBASI, S.A., 1998. Risk Assessment in the Chemical Process Industries: Advanced Techniques, Discovery Publishing House, New Delhi, 1998.

KLETZ T. A., 1988. What Went Wrong? – Case Histories of Process Plant Disasters, Gulf Publishing Company. Segunda Edição. EUA. Texas. ISBN 0-87201-919-5

KLETZ, T.A. (1997), Hazop--past and future, Elsevier, Reliability Engineering and System Safety 55, paginas 263-266

KUO, K. K. Y. 1986. Principles of Combustion, Singapore, John Wiley and Son Publishers. 1986. ISBN 85-22627;

LEES, F.P., 1996. Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control. Volume 1, 2a. Edição. Butterworth-Heinemann Publisher, Oxford. ISBN 0-7506-1547-8.

LEES, F.P., 1996. Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control. Volume 2, 2a. Edição. Butterworth-Heinemann Publisher, Oxford. ISBN 0-7506-1547-8.

LEES, F.P., 1996. Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control. Volume 3, 2a. Edição. Butterworth-Heinemann Publisher, Oxford. ISBN 0-7506-1547-8.

MALISKA, C. R. 2004. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. Rio de Janeiro, Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A.

MARTIN, J.C. 2008. Incendies Et Explosions D'atmosphère. Italie, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Première édition. ISBN 978-2-88074-755-8.

MERCX, W. P. M., e VAN DEN BERG A. C., HAYHURST, C. J. ROBERTSON, N. J. e MORAN, K. C. 2000. Developments in vapour cloud explosion blast modeling. TNO Prins Maurits Laboratory. Journal of Hazardous Materials 71 _2000. 301–319

MERCX, W. P. M. VAN DEN BERG, A. C. HAYHURST, C. J. ROBERTSON N. J. e MORAN, K. C 2000. Developments in vapour cloud explosion blast modelling. TNO Prins Maurits Laboratory. Journal of Hazardous Materials 71 _2000. 301–319

MEYER, R. 1977. Explosives. Gebr. Diesbach. Germany. 1977;

MOLAK, V. 1997. Fundamentals of Risk Analysis and Risk Management. Lewis Publishers - CRC Press Inc. Ohio. ISBN 1-56670-130-9.

MORAN, M J.; SHAPIRO, HOWARD N. 1996. Fundamentals of Engineering Thermodynamics (3rd Ed.). 1996. New York; Toronto: J. Wiley& Sons. ISBN 0-471-07681-3

MORAN, MICHAEL J.; SHAPIRO, HOWARD N. 1996. Fundamentals of Engineering Thermodynamics (3rd Ed.). 1996. New York; Toronto: J. Wiley& Sons. ISBN 0-471-07681-3.

CPR 12E - COMMITTEE FOR THE PREVENTION OF DISASTERS. 1997. Methods for Determining and processing probabilities (RED BOOK). Netherlands. ISBN 90-12-08543-8.

PAPAZOGLU, I. A. and ANEZIRIS, O. N. 1999. Uncertainty quantification in the health consequences of the boiling liquid expanding vapour explosion phenomenon. Institute of Nuclear Technology Radiation Protection, National Center for Scientific Research 'DEMOKRITOS, Greece

PULA, R., KHAN, F.I., VEITCH, B. e AMYOTTE, P.R. 2008. A Grid Based Approach for Fire and Explosion Consequence Analysis. Web of science

RAO, K.D., GOPIKA, V., SANYASI, V.V.S, KUSHWAHA, H.S., VERMA, A.K., SRIVIDYA, A. 2009. Dynamic Fault Tree Analysis Using Monte Carlos Simulation in Probability Safety

Assessment. Elsevier. Journal of Reliability Engineering and System Safety 94, paginas 872-883.

RIO GRANDE DO SUL (ESTADO). BRASIL. 2001. Departamento de Controle Ambiental / Divisão de Controle da Poluição Industrial. *Manual de Análise de Riscos Industriais*. ED. FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE ROESSLER – FEPAM, Revisão FEPAM N.o01/01 Março. 2001.

RIO DE JANEIRO (ESTADO) FEEMA. 1999. Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente, Instrução Técnica para Elaboração de Estudo de Análise de Risco, Rio de Janeiro. RJ. 1999.

SA, T. S. 2008. Análise Quantitativa De Risco Aplicada À Indústria De Gases; Projeto Final do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2008.

SAO PAULO (ESTADO) CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. 2001. Manual de Orientação para a Elaboração de Estudos de Análise de Risco. São Paulo, SP. CETESP. 2001.

SALZANO, E e COZZANI, V. 2005. The analysis of domino accidents triggered by vapor cloud explosions. Web of science

SIU KUI AU, ZHI-HUA WANG AND SIU-MING LO. 2007. Compartment fire risk analysis by advanced Monte Carlo simulation. Web of Science

SOLOJENTSEV, E.D. 2005. Scenario Logic and Probabilistic Management of Risk in Business and Engineering. Publicado por Springer Science, Boston. ISBN 1-4020-2977-2.

SUNDIN, E., AMMENBERG, J. 2005. Products in environmental management system: drivers, barriers and experiences. Journal of Cleaner Production #13, pages 405-415. 2005

TANNEHILL, J. C., ANDERSON, DALE A. E PLETCHER, RICHARD H. 1997. 2nd Edition. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, USA. Taylor & Francis Publisher. ISBN 1-56032-046-X. 1997

URBANSKI, T. 1964. Chemistry and Technology of Explosives, Volume 01; Department of Technology, Politechnika Warszawa. Pergamon Press. LONDON. 1964.

VAN DEN BERG, A.C., M. M. VAN DER VOORT, J. WEERHEIJM AND N. H. A. VERSLOOT. 2004. Expansion-controlled evaporation: a safe approach to BLEVE blast. TNO Prins Maurits Laboratory. The Netherlands

VAN DEN BERG, A.C., VOORT, M. M. V. D., WEERHEIJM, J. and VERSLOT, N. H. A.. 2004. Expansion-controlled evaporation: a safe approach to BLEVE blast. TNO Prins Maurits Laboratory. The Netherlands

VINCOLI, J.W. 2006. Basic Guide to System Safety. John Wiley & Sons. Segunda Edição. ISBN 0-471-72241-3.

VINNEM, J.E., 1998. Evaluation of Methodology for QRA in Offshore Operations. Elsevier, Journal of Reliability Engineering and System Safety 61, Pags 39-52. PII S0951-8320 (97) 00063-X

WAI-CHING TERESA LING AND ROBERT BRADY WILLIAMSON. 2003. Modeling of fire spread through probabilistic networks. College of Engineering, University of California, Berkeley, California 94720, U.S.A.

XU, K., TANG, L.C., XIE, M., HO, S.L., ZHU, M.L. 2002. Fuzzy Assessment of FMEA for Engine Systems. Elsevier, Reliability Engineering and System Safety. Paginas 17-29.

YET-POLE I, CHI-MIN SHU AND CHING-HONG CHONG. 2009. Applications of 3D QRA technique to the fire / explosion simulation and hazard mitigation within a naphtha-cracking plant. Department of Safety, Health and Environmental Engineering, National Yunlin University of Science and Technology, Douliou, Taiwan

GLOSSARIO

APP	Análise Preliminar de Perigos
APR	Análise Preliminar de Riscos
APS	Análise Probabilística de Segurança
AQR	Análise Quantitativa de Riscos
BLEVE	“ <i>Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion</i> ” ou Explosão por expansão do Vapor de Líquido em Ebulição ocorre quando um recipiente contendo gases liquefeitos inflamáveis sofre aquecimento levando ao aumento interno da pressão do recipiente e a perda de resistência do material do mesmo.
Boil over	Explosão devido a evaporação súbita da água residual em tanques de petróleo após incêndio prolongado.
Bola de Fogo	Ocorre em decorrência de um BLEVE de líquido inflamável. É uma bola de gás liquefeito por pressurização liberada repentinamente em virtude de um BLEVE, entrando imediatamente em ignição.
CIPA	Comissão Interna de Prevenção de Acidentes (Lei 6.514/77 – NR05)
Deflagração	Decomposição química ocorrendo a velocidades elevadas, SEM geração de onda de choque.
Detonação	Decomposição química ocorrendo a velocidades elevadas (superiores a de propagação do som), ocasionando onda de choque
EPI	Equipamento de Proteção Individual (Lei 6.514/77 – NR06)
Explosão	Pode ocorrer de duas formas: Química (Detonação) ou física (através de alívio de pressão, ex: rompimento de um cilindro pressurizado)
Explosão em Nuvem	A turbulência devido a obstáculos na área da região de combustão aumenta a velocidade de frente da chama e leva a explosão por deflagração.
FMEA	“ <i>Failure Mode and Effect Analysis</i> ” (Análise de Efeito e Modo de Falhas)
HazOp	Hazardous Operabilities (Perigos de Operações)
Incêndio em Jato	Formação de jato de material inflamável, devido a furo em linha pressurizada, com posterior ignição.
Incêndio em Nuvem	Para a maioria dos gases inflamáveis, a velocidade de queima é muito baixa e a velocidade de expansão não é elevada.

Incêndio em Poça	Liberação de líquido inflamável, formando uma poça e posterior ignição desta poça.
Nuvem Inflamável	Liberação de líquido ou gás inflamável com formação de nuvem.
PCMSO	Programa de Controle em Medicina e Saúde Ocupacional (Lei 6.514/77 – NR07)
Perigo	Propriedade de causar dano inerente a substância, processo ou produto
PPRA	Programa de Prevenção de Risco de Acidentes (Lei 6.514/77 – NR09)
Probit	“Parâmetro que serve para relacionar a intensidade de fenômenos como radiação térmica, sobre pressão e concentração tóxica com os danos que podem causar. O Probit (unidade de probabilidade) é uma variável randômica com média 5 e variância 1. O valor do Probit é relacionado a uma determinada porcentagem através de curvas ou tabelas.” (CETESB, P4.261)
QML	Quantidade de Momento Linear
RAC	“ <i>Risk Assessment Code</i> ” – Código de gradação do Risco
Risco	Capacidade de ocorrer danos, em função de probabilidade e severidade
ISO	International standard organization
PDCA	Plan – do – check – act
APP	Análise Preliminar de Perigos
APR	Análise Preliminar de Riscos
APS	Análise Probabilística de Segurança
AQR	Análise Quantitativa de Riscos
BLEVE	“ <i>Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion</i> ” ou Explosão por expansão do Vapor de Líquido em Ebulição ocorre quando um recipiente contendo gases liquefeitos inflamáveis sofre aquecimento levando ao aumento interno da pressão do recipiente e a perda de resistência do material do mesmo.
Boil over	Explosão devido a evaporação súbita da água residual em tanques de petróleo após incêndio prolongado.

Bola de Fogo	Ocorre em decorrência de um BLEVE de líquido inflamável. É uma bola de gás liquefeito por pressurização liberada repentinamente em virtude de um BLEVE, entrando imediatamente em ignição.
CIPA	Comissão Interna de Prevenção de Acidentes (Lei 6.514/77 – NR05)
Deflagração	Decomposição química ocorrendo a velocidades elevadas, SEM geração de onda de choque.
Detonação	Decomposição química ocorrendo a velocidades elevadas (superiores a de propagação do som), ocasionando onda de choque
EPI	Equipamento de Proteção Individual (Lei 6.514/77 – NR06)
Explosão	Pode ocorrer de duas formas: Química (Detonação) ou física (através de alívio de pressão, ex: rompimento de um cilindro pressurizado)
Explosão em Nuvem	A turbulência devido a obstáculos na área da região de combustão aumenta a velocidade de frente da chama e leva a explosão por deflagração.
FMEA	“ <i>Failure Mode and Effect Analysis</i> ” (Análise de Efeito e Modo de Falhas)
HazOp	Hazardous Operabilities (Perigos de Operações)
Incêndio em Jato	Formação de jato de material inflamável, devido a furo em linha pressurizada, com posterior ignição.
Incêndio em Nuvem	Para a maioria dos gases inflamáveis, a velocidade de queima é muito baixa e a velocidade de expansão não é elevada.
Incêndio em Poça	Liberação de líquido inflamável, formando uma poça e posterior ignição desta poça.
Nuvem	Liberação de líquido ou gás inflamável com formação de nuvem.

Inflamável

PCMSO	Programa de Controle em Medicina e Saúde Ocupacional (Lei 6.514/77 – NR07)
Perigo	Propriedade de causar dano inerente a substância, processo ou produto
PPRA	Programa de Prevenção de Risco de Acidentes (Lei 6.514/77 – NR09)
Probit	“Parâmetro que serve para relacionar a intensidade de fenômenos como radiação térmica, sobre pressão e concentração tóxica com os danos que podem causar. O Probit (unidade de probabilidade) é uma variável randômica com média 5 e variância 1. O valor do Probit é relacionado a uma determinada porcentagem através de curvas ou tabelas.” (CETESB, P4.261)
QML	Quantidade de Momento Linear
RAC	“ <i>Risk Assessment Code</i> ” – Código de gradação do Risco
Risco	Capacidade de ocorrer danos, em função de probabilidade e severidade
ISO	International standard organization
PDCA	Plan – do – check – act