

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
SISTEMAS DE PROCESSOS QUÍMICOS E INFORMÁTICA**

**“ABORDAGEM SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS DE
ACIDENTES EM INSTALAÇÕES DE PROCESSAMENTO QUÍMICO
E NUCLEAR”**

Autor: Murillo Senne Jr.

Orientador: Profa. Dra. Elizabete Jordão

Co-Orientador: Dr. Vanderley de Vasconcelos

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como
parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em
Engenharia Química

Julho – 2003
Campinas – São Paulo - Brasil

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	T/unicamp
	Se58a
V	EX
TOMBO BC	56876
PROC.	10/127104
C	☐
D	☒
PREÇO	11,00
DATA	20/01/2004
Nº CPD	

CM00194012-9

b7b id 309339

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Se58a

Senne Júnior, Murillo

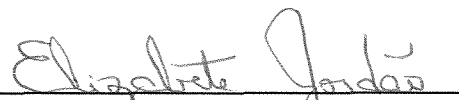
Abordagem sistemática para avaliação de riscos de acidentes em instalações de processamento químico e nuclear / Murillo Senne Júnior. --Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientadores: Elizabete Jordão e Vanderley de Vasconcelos.

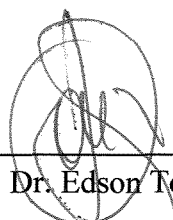
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Avaliação de riscos. 2. Prevenção de acidentes. 3. Líquido inflamáveis. 4. Substâncias radioativas. 5. Acidentes. I. Jordão, Elizabete. II. Vasconcelos, Vanderley de. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. IV. Título.

Tese de Doutorado defendida por Murillo Senne Junior e aprovada em 31 de julho de 2003 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



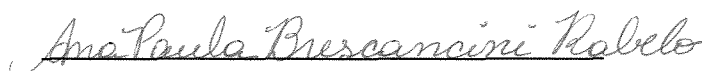
Prof. Dra. Elizabete Jordão
FEQ – UNICAMP



Prof. Dr. Edson Tomaz
FEQ – UNICAMP



Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi
FEQ – UNICAMP



Prof. Dra. Ana Paula Brescancini Rabelo
FAPESP – USP



Prof. Dr. Luiz Carlos Bertevello
FEI

2007/09/20

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado, em Engenharia Química, defendida por Murillo Senne Junior, em 31 de julho de 2003.



Profa. Dra. Elizabeth Jordão
Orientadora

Aos meus pais, esposa e filhos

AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Elizabete Jordão pela orientação, confiança e apoio prestado durante a realização deste trabalho.

Ao Doutor Vanderley de Vasconcelos pela orientação, pelas valiosas contribuições técnicas em todas as etapas que envolveram o desenvolvimento deste trabalho e pelo incentivo constante.

Ao Meteorologista Arivaldo Moraes do Sacramento pelas discussões técnicas, principalmente durante a fase de seleção e adaptação dos modelos para cálculo das consequências dos acidentes.

Ao Engenheiro Sérgio Carneiro dos Reis que de forma gentil e competente viabilizou o *software* que automatizou a metodologia desenvolvida neste trabalho.

Ao Doutor Wellington Antônio Soares que deu grande incentivo para que este trabalho fosse iniciado.

Aos colegas do Serviço de Tecnologia de Rejeitos do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN que, pelo profissionalismo e competência técnica, tornaram possível a elaboração deste trabalho durante o período em que exerci o cargo de Chefe.

Aos colegas do CDTN que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN e à Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, por terem possibilitado a realização deste trabalho.

RESUMO

Os acidentes industriais ocorridos nos últimos anos, em particular na década de 80, contribuíram de forma significativa, para despertar a atenção das autoridades governamentais, da indústria e da sociedade em geral, no sentido de buscar mecanismos para a prevenção desses eventos que comprometem a segurança das pessoas e a qualidade do meio ambiente. Assim, técnicas e métodos já amplamente utilizados nas indústrias bélica, aeronáutica e nuclear passaram a ser adaptados para a realização de estudos de análise e avaliação dos riscos associados a outras atividades industriais, em especial nas áreas de petróleo, química e petroquímica.

A análise de riscos em instalações industriais é realizada através da avaliação tanto da probabilidade ou frequência dos acidentes, quanto de suas consequências. Não existe, porém, disponível na literatura uma metodologia sistematizada que proporcione os meios para identificação dos acidentes possíveis de ocorrerem em uma instalação, bem como a identificação dos modelos para avaliação de suas consequências e a seleção das técnicas disponíveis para análise qualitativa ou quantitativa da possibilidade de ocorrência do acidente em análise.

O objetivo deste trabalho é desenvolver e implementar uma metodologia para identificação dos riscos de acidentes em instalações de processamento químico e nuclear e avaliação de suas consequências em pessoas. Para o desenvolvimento da metodologia foram identificados os principais acidentes possíveis de ocorrerem neste tipo de instalação e selecionadas técnicas qualitativas e quantitativas disponíveis para a identificação de riscos e avaliação de consequências de cada um dos acidentes identificados.

Para ilustrar a utilização da metodologia ela foi empregada em dois casos exemplos, adaptados da literatura, abordando acidentes que envolvem materiais inflamáveis, explosivos e radioativos. Foi desenvolvido o *software Metodologia para Avaliação de Riscos – MAR*, utilizando DELPHI, versão 5.0, com a finalidade de sistematizar e automatizar a aplicação da metodologia.

Palavras Chave: análise de riscos, avaliação de risco, acidente, metodologia

ABSTRACT

The industrial accidents which occurred in the last years, particularly in the 80's, contributed in a significant way to draw the attention of the government, the industry and the society as a whole to the mechanisms for preventing events that could affect people's safety and the environment quality. Techniques and methods extensively used in the nuclear, aeronautic and war industries so far were adapted to performing analysis and evaluation of the risks associated to other industrial activities, especially in the petroleum, chemistry and petrochemical areas.

The risk analysis in industrial facilities is carried out through the evaluation of the probability or frequency of the accidents and their consequences. However, no systematized methodology that could supply the tools for identifying possible accidents likely to take place in an installation is available in the literature. Neither existing are methodologies for the identification of the models for evaluation of the accidents' consequences nor for the selection of the available techniques for qualitative or quantitative analysis of the possibility of occurrence of the accident being focused.

The objective of this work is to develop and implement a methodology for identification of the risks of accidents in chemical and nuclear processing facilities as well as for the evaluation of their consequences on persons. For the development of the methodology, the main possible accidents that could occur in such installations were identified and the qualitative and quantitative techniques available for the identification of the risks and for the evaluation of the consequences of each identified accidents were selected.

The use of the methodology was illustrated by applying it in two case examples adapted from the literature, involving accidents with inflammable, explosives, and radioactive materials. The computer code *MRA - Methodology for Risk Assessment* was developed using DELPHI, version 5.0, with the purpose of systematizing and automating the application of the methodology.

Key words: risk analysis, risk assessment, accident, methodology

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE TABELAS.....	xvii
NOMENCLATURA	xix
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Conceitos Básicos	4
3.1.1 Conceito de Situação de Risco.....	4
3.1.2 Conceito de risco	4
3.2. Acidentes Potenciais em Instalações de Processamento Químico e Nuclear	5
3.3. Histórico de Acidentes.....	8
3.4. Análise de Consequência de Acidentes	25
3.4.1. Diâmetro de uma bola de fogo	25
3.4.2. Explosão de líquido e sólido	26
3.4.3. Explosão de nuvem de vapor (<i>vapor cloud explosion</i>)	27
3.4.4. BLEVE e bola de fogo	31
3.4.5. Incêndio em poça (<i>pool fire</i>)	33
3.4.6. Jato de fogo (<i>jet fire</i>)	39
3.4.7. Incêndio em nuvem de vapor (<i>flash fire</i>)	41
3.4.8. Concentração de material tóxico devida a liberação para a atmosfera.....	42
3.4.9. Concentração de material tóxico devida a liberação para interiores de prédios.....	44
3.4.10. Exposição externa de pessoas à radiação ionizante.....	45
3.4.10.1 Dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida à exposição de um indivíduo a uma fonte de radiação, emissora gama	45
3.4.10.2. Dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida a gama e nêutrons prontos em acidente de criticalidade.....	46

3.4.10.3 Dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida à radiação externa proveniente da liberação de material radioativo, emissor gama, para a atmosfera.....	47
3.4.10.4. Taxa de dose no corpo inteiro devida a liberação de material radioativo em interiores de prédios	48
3.4.11. Exposição interna de pessoas à radiação ionizante	49
3.4.11.1 Incorporação, por inalação, de substâncias radioativas liberadas para a atmosfera.....	49
3.4.11.2. Dose equivalente efetiva comprometida, por inalação, no órgão crítico devida a inalação de material radioativo liberado para a atmosfera	50
3.4.11.3. Taxa de dose equivalente efetiva comprometida, por inalação, no órgão crítico devida a inalação de material radioativo liberado em interiores de prédios	50
3.4.12. Explosão física de vasos contendo gases que se comportam como gás ideal.....	51
3.4.13. Explosão física de vasos contendo líquidos e vapores ou gases não ideais	58
3.4.14. Explosão física de vasos em locais distantes de superfícies refletoras	64
3.5. Técnicas Disponíveis para Identificação de Riscos	65
3.5.1. Estudo de Operabilidade e Riscos - <i>Hazard and Operability Studies</i> (HazOp).....	73
3.5.2. Análise de Árvore de Falhas (AAF).....	82
3.5.3. Análise de Modos de Falha e Efeitos (AMFE)	90
3.5.4. <i>What-If/Checklist</i> (WIC)	98
3.5.5. Análise Preliminar de Perigos (APP)	101
3.5.6. Análise de Árvore de Eventos (AAE)	107
3.6. Levantamento de <i>Softwares</i> Disponíveis para Avaliação de Riscos	111
4. METODOLOGIA.....	118
4.1. Abordagem Utilizada para Desenvolvimento da Metodologia.....	118
4.2. Metodologia Desenvolvida	119
5. CASOS EXEMPLOS	147
5.1 Caso Exemplo 1 (baseado em [32, 33]).....	147

5.2 Caso Exemplo 2 (baseado em [87]).....	167
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	182
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	184
ANEXO I	193
NOÇÕES BÁSICAS SOBRE OS EFEITOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE, CÁLCULO DE DOSE E FISSÃO NUCLEAR.....	194
ANEXO II.....	201
DESCRIÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> MAR - METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS.....	202

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Distância normalizada para detonação de cargas de TNT [32].	30
Figura 3.2 - Níveis de danos e mortes devido à radiação térmica recebida [32].	33
Figura 3.3 - Sobrepressão normalizada ($\bar{p}_s$) versus distância normalizada ($\bar{d}_{ef}$) [60].	53
Figura 3.4 - Sobrepressão normalizada ($\bar{p}_s$) versus distância normalizada ($\bar{d}_{ef}$) [60].	54
Figura 3.5 - Trabalho de expansão por unidade de massa do etano, propano e isobutano [32].	60
Figura 3.6 - Trabalho de expansão por unidade de volume de etano, propano e isobutano [32].	63
Figura 3.7 - Procedimento para execução de uma análise de riscos (baseado em [5]).	65
Figura 3.8 - Estrutura de uma árvore de falhas [68].	84
Figura 3.9 - Diagrama de causa e efeito mostrando alguns dos aspectos do problema relacionado ao evento topo “motor não dá partida” [68].	86
Figura 3.10 - Árvore de falhas para o problema relacionado ao evento topo “motor não dá partida” [68].	86
Figura 3.11 - Fluxograma da sequência de procedimentos para realizar uma AAF [68].	87
Figura 3.12 - Árvore de falhas (b) equivalente a uma mais complexa (a) [70].	89
Figura 3.13 - Exemplo de formulário para registro dos resultados da AMFE [68].	92
Figura 3.14 - Relação entre Causa, Modo e Efeito de Falha [68].	94
Figura 3.15 - Fluxograma para elaboração de uma AMFE [71].	97
Figura 3.16 - Exemplo de planilha para aplicação da técnica APP (baseada em [73]).	103
Figura 3.17 - Exemplo de uma matriz de risco (baseada em [73, 74]).	106
Figura 3.18 - Ilustração de um esquema de construção de uma árvore de eventos [75].	108
Figura 3.19 - Ilustração de uma árvore de eventos para o evento iniciador ruptura de uma tubulação de um vaso contendo material inflamável (baseada em [75]).	110

Figura 4.2 - Diagramas de estrutura hierárquica (a) e (b) para identificação de eventos acidentais típicos em instalações de processamento químico e nuclear.....	126
Figura 4.3 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento de gás inflamável/explosivo.....	127
Figura 4.4 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento contínuo de gás inflamável/explosivo.....	128
Figura 4.5 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento instantâneo de gás inflamável/explosivo.....	129
Figura 4.6 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento de líquido inflamável/explosivo.....	130
Figura 4.7 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento contínuo de líquido inflamável/explosivo.....	131
Figura 4.8 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento instantâneo de líquido inflamável/explosivo.....	132
Figura 4.9 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de exposição de sólido inflamável/explosivo.....	133
Figura 4.10 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de moderação ou perda de geometria segura de gás radioativo.....	134
Figura 4.11 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento de gás radioativo.....	135

Figura 4.12 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de moderação ou perda de geometria segura de líquido radioativo.	136
Figura 4.13 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento de líquido radioativo.....	137
Figura 4.14 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de moderação ou perda de geometria segura de sólido radioativo.....	138
Figura 4.15 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de liberação de sólido radioativo.....	139
Figura 4.16 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento de gás tóxico	140
Figura 4.17 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento de líquido tóxico.....	141
Figura 4.18 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de exposição de sólido tóxico	142
Figura 4.19 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em explosão física de vasos contendo líquidos e vapores ou gases.....	143
Figura 4.20 - Árvore de decisão para auxiliar a seleção de técnicas para a análise qualitativa ou quantitativa da possibilidade/frequência de ocorrência de um acidente	144
Figura 4.21 - Matriz de risco desenvolvida para avaliar comparativamente a importância dos riscos.....	146
Figura 5.1 - Diagrama esquemático do tanque de armazenamento de propano, e a sua tubulação de alimentação (elaborado a partir de [32]).....	148
Figura 5.2 - Leiaute da instalação de estocagem de propano (baseado em [33])......	149
Figura 5.3 - Leiaute da instalação de armazenagem de UO_2 , com enriquecimento de 5 % em U-235.	167

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Alguns acidentes ocorridos com amônia no mundo, no período de 1962 a 1996 [12, 13, 14, 15, 16].	10
Tabela 3.2 - Alguns acidentes ocorridos no mundo, envolvendo GLP, propano e butano, no período de 1943 a 1996 [12, 13, 16].....	12
Tabela 3.3 - Alguns acidentes ocorridos no mundo, com hidrogênio, no período de 1937 a 1996 [12, 13, 16].	16
Tabela 3.4 - Alguns acidentes ocorridos no mundo, com hexafluoreto de urânio (UF_6), dióxido de urânio (UO_2), fluoreto de uranila (UO_2F_2) e ácido fluorídrico (HF), no período de 1944 a 2000 [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25].....	17
Tabela 3.5 - Acidentes investigados pela EPA, no período de 1994 a 1998 [24].	22
Tabela 3.6 - Acidentes de criticalidade ocorridos no mundo, no período de 1953 a 2000 [26].	24
Tabela 3.7 - Efeitos devidos à sobrepressão oriunda de explosões [31].	27
Tabela 3.8 - Fração da energia total convertida em radiação [40, 42].	38
Tabela 3.9 - Possíveis efeitos determinísticos, em pessoas, resultantes da exposição aguda de corpo inteiro à radiação ionizante (baseada em [48, 50, 51, 52])	46
Tabela 3.10 - Fatores de ajuste de $\bar{p}_s$ para vasos cilíndricos a vários $\bar{d}_{ef}$ [60].	55
Tabela 3.11 - Fatores de ajuste de $\bar{p}_s$ para vasos esféricos a vários $\bar{d}_{ef}$ [60].	55
Tabela 3.12 - Trabalho realizado na expansão de amônia, dióxido de carbono, nitrogênio e oxigênio [32].	59
Tabela 3.13 - Palavras-guia e seus significados [5].	76
Tabela 3.14 - Exemplos de desvios utilizados no desenvolvimento de um HazOp [5].	77
Tabela 3.15 - Símbolos de portas lógicas utilizados na construção das árvores de falhas [68].....	84
Tabela 3.16 - Símbolos de eventos, utilizados na construção das árvores de falhas [69].	85
Tabela 3.17 - Categoria das conseqüências para ser utilizada em APP [1].....	104

Tabela 4.1 - Planilha simplificada para orientação da aplicação da metodologia proposta para avaliação de riscos (baseada em [1, 5, 6, 73, 74, 84]).	123
Tabela 4.2 - Consequências para as Pessoas sob Ameaça (coluna 7P) (baseada em [74, 84]).	124
Tabela 4.3 - Velocidade de Detecção (coluna 7V) (baseada em [84, 85]).	124
Tabela 4.4 - Frequência (coluna 8) (baseada em [74, 84]).	125
Tabela 4.5 - Frequência (coluna 8) (baseada em [74, 84]).	125
Tabela 4.6 - Classificação do risco quanto à importância (coluna 9) (baseada em [84, 86])	145

NOMENCLATURA

Símbolos

A = área total da poça [m^2]

A_v = área do local de vazamento [m^2]

A_s = área transversal da sala [m^2]

B = taxa de respiração [m^3/s]

$C_{(d)}$ = concentração de material tóxico em áreas internas a prédios em função da distância
[mg/m^3]

c_d = coeficiente de descarga

C_d^i = concentração do radionuclídeo i a uma distância d [Bq/m^3]

C_L = calor latente de vaporização [kJ/kg]

C_M = fração molar do combustível na mistura estequiométrica combustível/ar

c_m = coeficiente de transferência de massa [m/s]

c_m^o = coeficiente de transferência de massa de referência [cm/s]

C_p = calor específico [$\text{kJ}/\text{kg.K}$]

C_R = concentração da substância radioativa no ar em função da distância [mg/m^3]

D = diâmetro da poça [m]

d = distância mínima de segurança [m]

$\bar{d}$ = distância normalizada [$\text{m}/\text{kg}^{1/3}$]

D_b = diâmetro da bola de fogo [m]

d_b = distância entre o centro da bola de fogo e o ponto de interesse [m]

$D_{b\max}$ = diâmetro máximo da bola de fogo [m]

d_c = distância entre o local onde ocorreu a criticalidade e o ponto de interesse [km]

d_f = distância entre a fonte e o ponto de interesse [m]

D_j = diâmetro do furo por onde está ocorrendo o vazamento [m]

DFC_{Ti} = fator de conversão de dose equivalente efetiva comprometida, por inalação, para o órgão T devida ao nuclídeo i , [Sv/Bq]

d_h = distância horizontal entre o centro da bola de fogo e o ponto de interesse [m]

D_{max} = diâmetro máximo da poça [m]

d_p = distância entre o centro geométrico da chama e o ponto de interesse [m]

d_r = distância real entre o material explosivo e o ponto de interesse [m]

d_s = distância entre a sala onde ocorreu o acidente e o ponto de interesse [m]

d_v = distância entre o centro do vaso e o ponto de interesse [m]

e = energia interna específica [J/kg]

E_r = fluxo térmico recebido no ponto de interesse [kW/m²]

$\bar{E}\gamma_i$ = energia média dos raios gama do radionuclídeo i [MeV/des]

f = fração da energia total convertida em radiação térmica

F_e = fator de rendimento para explosão de nuvem

f_e = fração da energia total convertida em radiação térmica

f_i = fração de ignição

F_p = fator geométrico da fonte pontual [m⁻²]

G = constante gravitacional (1 kg.m/N.s²)

g = aceleração da gravidade (9,81 m/s²)

H = altura da chama visível [m]

h = entalpia específica [J/kg]

h_b = altura do centro da bola de fogo [m]

H_{Ei} = dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida ao radionuclídeo i emissor gama [Sv]

$\dot{H}_{Ei}$ = taxa de dose equivalente efetiva no corpo inteiro [Sv/s]

$\dot{H}_{EBi}$ = taxa de dose devida à inalação do radionuclídeo i [Sv/s]

H_{En} = dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida aos nêutrons [Sv]

H_{ETi} = dose equivalente efetiva comprometida no órgão crítico, T , devida à inalação do radionuclídeo i [Sv]

$H_{E\gamma}$ = dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida aos raios gama [Sv]

k = razão do calor específico (C_p/C_v)

L = comprimento visível da chama turbulenta medido a partir do ponto de vazamento [m]

M = massa do material combustível [kg]

$\dot{m}$ = vazão mássica do combustível através do local de vazamento [kg/s]

M_a = massa molar do ar [kg/mol]

M_b = massa de combustível na bola de fogo [kg]

m_B = taxa de queima [kg/m².s]

M_c = massa molar do combustível [kg/mol]

M_f = massa do fluido liberada [kg]

M_g = massa molar do gás [kg/kmol]

M_I = massa da substância radioativa incorporada por inalação [mg]

M_l = massa de combustível liberada [kg]

M_{le} = massa molar do líquido em evaporação [kg/mol]

M_n = massa de combustível na nuvem [kg]

M_o = massa molar da água [g/mol]

M_R = massa da substância radioativa liberada para a atmosfera [mg]

N = número máximo de fissões esperado para o acidente de criticalidade

p_1 = pressão a montante do local de vazamento [Pa]

p_2 = pressão a jusante do ponto de vazamento [Pa]

p_i = pressão interna absoluta do vaso [N/m²]

p_{abs} = pressão absoluta [N/m²]

p_o = pressão atmosférica [N/m²]

p_{om} = pressão atmosférica ao nível do mar (~ 101,3 kPa)

p_{sabs} = pico da sobrepressão absoluto [kPa]

P_{sat} = pressão de saturação de vapor do líquido [atm]

p_w = pressão parcial do vapor d'água [Pa]

Q = atividade da fonte [Bq]

$\dot{Q}$ = taxa de liberação do material tóxico para a atmosfera [mg/s]

Q_o = massa total do material tóxico liberado na sala [mg]

Q_i = atividade total do radionuclídeo i liberada para a atmosfera [Bq]

Q_{o_i} = atividade total do radionuclídeo i liberada na sala [Bq]

Q_{o_i} = atividade total do radionuclídeo i liberado na sala [Bq]

Q_{o_i} = atividade total do radionuclídeo i liberado na sala [Bq]

R_e = vazão de exaustão ou taxa de fuga [m^3/s]

R_g = constante do gás ideal ($82,057 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{atm}/\text{mol} \cdot \text{K}$)

R_e = vazão de exaustão ou taxa de fuga [m^3/s]

R_g = constante do gás ideal ($0,082057 \text{ m}^3 \cdot \text{atm}/\text{kmol} \cdot \text{K}$)

r_o = raio inicial do vaso [m]

R_l = vazão do líquido [m^3/s]

T_l = temperatura a montante do ponto de vazamento [K]

t = tempo de duração da exposição de pessoas à nuvem de substância radioativa [s]

T_a = temperatura ambiente [K]

t_a = tempo de permanência do indivíduo a uma distância d do local do acidente [s]

T_e = temperatura de ebulição [K]

t_f = tempo de exposição do indivíduo à fonte de radiação [s]

T_g = temperatura absoluta do gás [K]

T_l = temperatura do líquido [K]

t_l = tempo de duração da liberação de substância radioativa para a atmosfera

T_f = temperatura adiabática da chama [K]

T_j = temperatura do jato do fluido [K]

u_a = umidade relativa do ar [%]

V = volume da sala [m^3]

v = volume específico [m^3/kg]

V_f = quantidade do fluido [volume ou massa]

V_g = volume do gás no vaso [m^3]

V_v = volume do vaso [m^3]

W = massa equivalente do material combustível, em kg de TNT

X = razão de vapor

$\dot{y}$ = taxa de decréscimo vertical do nível da poça [m/s]

$\dot{y}_{\max}$ = taxa de decréscimo vertical máximo do nível da poça [m/s]

ΔH^* = calor de vaporização modificado, no ponto de ebulição do líquido [kJ/kg]

ΔH_c = calor de combustão [kJ/kg]

ΔH_v = calor de vaporização [kJ/kg]

ΔT = diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura de ebulição, à pressão ambiente [K]

$\frac{\chi}{Q}(d)$ = fator de difusão atmosférica em função da distância [s/m^3]

Letras Gregas

α_M = moles de reagente (combustível e ar) por mol do produto (CO_2 , H_2O e N_2) para uma mistura estequiométrica combustível/ar

ρ_a = massa específica do ar ($1,2 \text{ kg/m}^3$ a 20°C e 1 atm)

ρ_l = massa específica do líquido [kg/m^3]

τ_a = transmissividade atmosférica

Γ_i = constante gama do radionuclídeo i [Gy/h.Bq],

$\chi_{(d)}$ = concentração de material tóxico na atmosfera na distância d [mg/m^3]

λ_i = constante de decaimento do radionuclídeo i [1/s]

.....

1. INTRODUÇÃO

Os acidentes industriais ocorridos nos últimos anos, em particular na década de 80, contribuíram de forma significativa para despertar a atenção das autoridades governamentais, da indústria e da sociedade em geral, no sentido de buscar mecanismos para a prevenção desses episódios que comprometem a segurança das pessoas e a qualidade do meio ambiente [1]. Isto tem se tornado mais importante atualmente com o conceito de Responsabilidade Social em uso crescente nas empresas que utilizam as normas ISO14000 (Sistema de Gestão Ambiental), BS8800 (Diretrizes para Sistemas de Gerenciamento da Segurança e Saúde Ocupacional), SA8000 (Responsabilidade Social) e OSHAS18000 (Sistemas de Gestão da Segurança e Saúde Ocupacional).

Assim, as técnicas e métodos já amplamente utilizados nas indústrias bélica, aeronáutica e nuclear passaram a ser adaptados para a realização de estudos de análise e avaliação dos riscos associados a outras atividades industriais, em especial nas áreas de petróleo, química e petroquímica [1].

No Brasil, a Resolução Nº 1, de 23/01/86, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), instituiu a necessidade de realização do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e do respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), para o licenciamento de atividades modificadoras do meio ambiente. Os estudos de análise de riscos passaram a ser incorporados nesse processo, para determinados tipos de empreendimentos, de forma que, além dos aspectos relacionados com a poluição crônica, também a prevenção de acidentes maiores passou a ser contemplada no processo de licenciamento [1].

Da mesma forma, os estudos de análise de riscos têm se mostrado importantes na análise de instalações industriais já em operação, porque permitem que os riscos sejam avaliados e gerenciados a contento, mesmo que estes empreendimentos não estejam vinculados a um processo de licenciamento formal.

A análise de riscos em instalações industriais é realizada através da avaliação tanto da probabilidade ou frequência dos acidentes, quanto de suas conseqüências. Para auxiliar

nesta tarefa existem disponíveis uma grande quantidade de técnicas e *softwares* empregados para agilizar ou viabilizar sua utilização [2, 3].

Não existe disponível na literatura uma metodologia sistematizada que proporcione os meios para identificação dos acidentes possíveis de ocorrerem em uma instalação, bem como a identificação dos modelos para avaliação de suas conseqüências e a seleção das técnicas disponíveis para análise qualitativa ou quantitativa da sua possibilidade de ocorrência.

Pretende-se neste trabalho propor uma abordagem sistemática da avaliação de riscos de acidentes em instalações de processamento químico e nuclear. A metodologia desenvolvida deverá servir de guia para selecionar e aplicar técnicas para identificação dos diferentes acidentes possíveis, cada um deles com complexos modelos de avaliação de conseqüências.

Não serão abordados, neste trabalho, os acidentes causados por eventos externos à instalação ou por fenômenos naturais, nem as conseqüências dos acidentes ao meio ambiente.

2. OBJETIVO

Objetivo geral:

O objetivo deste trabalho é desenvolver e implementar uma metodologia para identificação dos riscos de acidentes em instalações de processamento químico e nuclear e avaliação de suas consequências.

Objetivos específicos:

- Seleção de técnicas qualitativas e quantitativas disponíveis para identificação de riscos.
- Seleção e adaptação de equações e modelos de cálculos para avaliação de consequências de acidentes.
- Levantamento de *softwares* disponíveis para auxiliar na avaliação de riscos.
- Demonstração da viabilidade de utilização da metodologia através da sua aplicação em casos exemplos.
- Implementação de *software* para facilitar a utilização da metodologia desenvolvida.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados, inicialmente, o conceito de risco, suas possíveis classificações e uma visão geral dos setores de uma indústria que oferecem maior risco potencial para ocorrência de acidentes e os tipos desses acidentes.

São apresentados, de forma resumida, alguns acidentes ocorridos em instalações industriais envolvendo processos químicos e nucleares, cobrindo o período de 1943 a 2000. Este histórico apresentado tem como finalidade auxiliar na identificação dos tipos de acidentes a serem abordados pela metodologia.

São apresentadas, também, breves descrições de algumas técnicas de análise de riscos e de modelos de cálculo de conseqüências dos acidentes mais comuns. Apresentam-se, ainda, alguns *softwares*, comerciais e *freewares*, disponíveis para uso na análise de risco de instalações, sistemas e componentes.

3.1. Conceitos Básicos

3.1.1 Conceito de Situação de Risco

Situação de Risco ou Perigo pode ser definido como a existência de uma ou mais condições de uma variável com potencial necessário para causar danos. Esses danos podem ser entendidos como lesões a pessoas, danos a equipamentos e instalações, danos ao meio ambiente, perda de material em processo ou redução da capacidade de produção [4, 5].

3.1.2 Conceito de risco

O *Risco* pode ser definido como sendo o produto da frequência de ocorrência de um evento, dentro de um período de tempo, pela magnitude dos danos que este evento possa causar a um indivíduo, aos trabalhadores, ao público, à propriedade privada ou pública ou ao meio ambiente [6, 7].

Dependendo da sua origem, os riscos podem ser classificados como:

- Riscos Naturais

São aqueles causados por fenômenos naturais, tais como terremotos, erupções vulcânicas, inundações, etc. [7].

- Riscos Tecnológicos

São aqueles associados à tecnologia, tais como: riscos químicos, risco nuclear, transporte de produtos perigosos, etc. [7].

- Riscos Humanos

São aqueles associados aos seres humanos, tais como omissão na execução de uma tarefa ou de passos dela, erros de controle ou comando, etc. [8].

- Riscos Empresariais

São aqueles que envolvem a perda ou ganho financeiro, tais como mudanças em planos econômicos, aplicações financeiras, etc [7].

Todas as atividades, mesmo as mais simples, podem envolver risco, ou seja, podem levar a situações que causem danos. Para que haja risco é necessário, portanto, que existam duas condições:

- 1) que haja possibilidade da ocorrência de uma situação indesejada e
- 2) que esta situação produza algum dano.

Matematicamente, o risco envolvido com a ocorrência de um determinado evento pode ser definido como [9]:

$$Risco \left[\frac{\text{consequência}}{\text{tempo}} \right] = \text{frequência} \left[\frac{\text{evento}}{\text{tempo}} \right] \times \text{magnitude} \left[\frac{\text{consequência}}{\text{evento}} \right]$$

Neste trabalho, apesar da maioria das técnicas apresentadas se aplicarem a todos os tipos de riscos citados, o foco será o *Risco Tecnológico* e, mais especificamente, o risco tecnológico associado aos processos químicos e nucleares.

3.2. Acidentes Potenciais em Instalações de Processamento Químico e Nuclear

O crescente desenvolvimento da sociedade ocidental tem sido graças aos avanços tecnológicos, os quais originaram produtos que permitiram o estilo de vida de hoje.

Medicamentos, detergentes, tintas, plásticos e combustíveis, por exemplo, vêm de diferentes processos industriais, de natureza química.

Existe um risco associado a trabalhar ou morar próximo a indústrias químicas ou nucleares, onde se processam, manuseiam, transportam e armazenam produtos químicos, pois existe a possibilidade de ocorrer um acidente que pode ter consequências tanto em áreas internas quanto externas à instalação.

Uma indústria química ou nuclear é o lugar onde produtos químicos ou radioativos são processados ou transformados para torná-los matérias primas para outras indústrias ou para vendê-los como produtos acabados. Nestes tipos de indústrias pode-se identificar, basicamente, três setores como sendo os que oferecem maior risco potencial [7]:

- áreas de processo

São as áreas onde as transformações ou reações acontecem. Acidentes nestas áreas podem ter consequências tanto internamente quanto externamente à instalação.

- áreas de armazenamento

Estas áreas contêm, geralmente, tanques, depósitos e contêineres com os produtos utilizados nos processos. Embora a chance de ocorrer um acidente nessas áreas seja pequena, se ele ocorrer as consequências externas poderão ser bastante graves, em função da grande quantidade de produto normalmente envolvido.

- tubulações

Certas substâncias são transportadas para áreas de processo diretamente do produtor ou da área de armazenamento por tubulações superficiais ou subterrâneas, tais como gás natural, GLP e etileno. Essas tubulações também estão sujeitas a acidentes que podem ter consequências tanto interna quanto externamente à instalação.

Alguns acidentes na indústria química ou nuclear podem ter consequências apenas nos limites de propriedade da indústria, e outros podem ter efeitos fora da instalação e afetar a população local, a propriedade privada ou pública e o meio ambiente, em maior ou menor extensão.

Os acidentes mais freqüentes envolvem [7]:

- fogo

Consiste na oxidação rápida entre um combustível e um comburente (normalmente o oxigênio do ar). O fogo em uma indústria química é caracterizado normalmente por chamas com grande volume e muita fumaça.

As chamas podem produzir queimaduras através da radiação térmica, e a fumaça pode ser tóxica ou asfixiante. Os danos causados dependem dos produtos envolvidos no incêndio, da distância e do tempo de exposição.

- explosão

A explosão é uma reação produzida em alta velocidade com uma expansão violenta de gases. O efeito principal da explosão é a onda de choque que pode até destruir estruturas, equipamentos e componentes próximos, além do risco à vida das pessoas expostas.

Outro efeito causado pela explosão, no caso de envolvimento de produtos radioativos, é a nuvem de particulado com um percentual em suspensão desses produtos.

- liberações radioativas ou tóxicas

Liberação radioativa ou tóxica é a exposição accidental de produtos radioativos ou tóxicos originalmente contidos em sistemas de contenção ou de transporte. No caso de gases e vapores, o efeito principal é decorrente da nuvem do produto liberado, e as conseqüências dependerão das características do produto, das condições meteorológicas e da topografia do terreno.

Os acidentes citados podem ocorrer de diferentes formas, dependendo, por exemplo, do tipo de material, da forma de armazenamento, do inventário e das condições de liberação, sendo a cada uma aplicado um modelo de cálculo específico. Por exemplo [10, 11]:

- para acidentes envolvendo fogo tem-se modelos para cálculo de bola de fogo (*fireball*), jato de fogo (*jet fire*), incêndio em poças (*pool fire*), radiação térmica, etc.,

- para acidentes envolvendo explosões tem-se modelos para explosão de sólidos, BLEVE (*boiling liquid expanding vapor explosion*), explosão de nuvens de vapor não-confinada (*UVCE – unconfined vapor cloud explosion*), etc.,
- para acidentes envolvendo liberações radioativas ou tóxicas tem-se modelos para difusão atmosférica, dispersão de gás pesado, dispersão de gás leve, elevação de pluma, liberação líquida, liberação gasosa, exposição a material radioativo, etc.

3.3. Histórico de Acidentes

A importância dos acidentes industriais está diretamente relacionada à evolução histórica da produção e consumo de substâncias químicas a partir da II Guerra Mundial, quando o aumento da demanda por novos materiais e produtos químicos, acompanhado pela mudança da base de carvão para petróleo, conduziu ao desenvolvimento e expansão do complexo químico industrial. A natureza altamente competitiva deste setor industrial, aliada ao crescimento da economia em escala mundial e ao rápido avanço da tecnologia, possibilitaram o aumento das dimensões das plantas industriais e da complexidade dos processos produtivos.

Nos anos 60, por exemplo, uma planta industrial para craquear nafta e produzir 50.000 toneladas por ano de etileno era considerada de grande porte. A partir dos anos 80, plantas para produção de etileno e propileno ultrapassaram a escala de um milhão de toneladas por ano. O crescimento das atividades de produção, armazenamento e transporte de substâncias químicas em nível global provocou um aumento no número de pessoas expostas aos seus riscos [6].

As indústrias de processo químico e nuclear se caracterizam por possuírem sistemas de produção complexos e que envolvem substâncias químicas perigosas para a saúde dos trabalhadores, para as comunidades vizinhas e para o meio ambiente. Neste tipo de indústria, normalmente os acidentes são eventos agudos, como explosões, incêndios e liberações, ocorrendo de forma individual ou combinada, envolvendo uma ou mais substâncias perigosas, com potencial de causar, simultaneamente, múltiplos danos ao meio ambiente e à saúde das pessoas expostas [6].

O que caracteriza esses acidentes não é somente sua capacidade de provocar mortes. É, também, o potencial da gravidade e extensão dos seus efeitos ultrapassarem os

limites de propriedade da indústria, atingindo bairros, cidades e países, e os efeitos a longo prazo, como teratogênese, carcinogênese e mutagênese. Ainda que muitos destes acidentes sejam conhecidos pelo seu impacto nas populações vizinhas e no meio ambiente, dados internacionais revelam que aproximadamente 90% das vítimas fatais destes eventos são os próprios trabalhadores [6].

A seguir são apresentados resumos de alguns acidentes ocorridos em instalações industriais, envolvendo amônia, GLP, propano, butano, hidrogênio, hexafluoreto de urânio, dióxido de urânio, fluoreto de uranila, ácido fluorídrico e de alguns acidentes investigados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (*Environmetal Protection Agency – EPA*).

- **Acidentes envolvendo amônia**

Na Tabela 3.1 são apresentados os acidentes mais significativos ocorridos com amônia no mundo, no período de 1962 a 1996 [12, 13, 14, 15, 16].

Na análise dos eventos apresentados pode-se observar que, devido às características de toxicidade e inflamabilidade da amônia, alguns acidentes resultaram em consequências bastante graves, implicando em mortes, ferimentos, remoção de um grande número de pessoas e danos materiais significativos.

Tabela 3.1 - Alguns acidentes ocorridos com amônia no mundo, no período de 1962 a 1996 [12, 13, 14, 15, 16].

Ano	Local	Resumo do Acidente	Mortos/Feridos
1962	Kentucky EUA	Tanque de óxido de etileno contaminado com amônia provocou explosão.	1/9
1968	Cincinnati EUA	Explosão de tanques de amônia em uma fábrica.	Não Disponível
1968	Glasgow Escócia	Explosão em pátio de estocagem resfriado levou à liberação de amônia e remoção dos trabalhadores.	0/0
1968	Lievin França	Liberação de 15 ton de amônia.	5/Não Disponível
1969	Iowa EUA	Trabalhadores romperam tubulação enquanto tentavam ampliar a linha principal. Ventos favoráveis impediram que a nuvem de amônia atingisse as casas próximas.	Não Disponível
1970	Iowa EUA	Danos de grandes proporções provocado por incidente em uma planta de processamento de amônia.	0/7
1970	Nebraska EUA	Liberação de 145 ton de amônia de um tanque de estocagem.	0/Não Disponível
1971	Londres Inglaterra	Explosão em um pátio de armazenamento. Cilindros de amônia explodiram durante incêndio.	0/11
1971	Arkansas EUA	Vazamento de 570 ton de amônia. Peixes e animais terrestres foram mortos. 10.000 acres de floresta foram danificados.	0/Não Disponível
1972	Carolina do Norte EUA	Formação de mistura explosiva pela concentração de amônia em ácido nítrico. Ignição explosiva pela reação com catalisador.	0/0
1973	Potchef-stroom África do Sul	Ruptura de extremidade de tanque de estocagem de amônia com liberação de 38 ton, devido à fragilização no tanque após reparo.	18/45
1973	Kansas City EUA	Liberação de 210 ton de amônia.	0/0

Tabela 3.1 - Alguns acidentes ocorridos com amônia no mundo, no período de 1962 a 1996.

(continuação)

Ano	Local	Resumo do Acidente	Mortos/Feridos
1974	Nebraska EUA	Sobreenchimento de tanque levou amônia para compressores. Abertura de válvula de alívio seguida de explosão por ignição pelo aquecedor de água a gás. Danos estruturais de grandes proporções.	Não Disponível
1974	Arklow Irlanda	Ruptura de tanque pressurizado a 30,4 bar. Pequenos danos no resto da instalação.	Não Disponível
1976	Zuid-Limburg Holanda	Explosão e incêndio na unidade de amônia de uma instalação. Ferimentos leves aos trabalhadores.	0/20
1976	Cartagena Colômbia	Explosão em fábrica de fertilizante de amônia anidra.	30/32
1977	Landskrona Suécia	Explosão na mangueira de um navio para um tanque em terra com formação de uma grande nuvem de gases de amônia.	2/2
1977	Cuernavaca México	Vazamento de amônia de uma tubulação com contaminação do sistema de esgoto. Remoção de moradores locais.	2/102
1977	Llandarcy Inglaterra	Incêndio em uma refinaria de óleo levou a vazamento de amônia.	0/0
1977	Thorganby Inglaterra	Liberação de 3 ton de amônia líquida após a ruptura de uma tubulação em fábrica de processamento de alimentos.	1/18
1978	Manfredônia Itália	Ruptura de válvula pressurizada no bombeamento de amônia de um caminhão tanque para a instalação. Remoção de 5.000 a 10.000 pessoas.	Não Disponível
1978	Halsa Noruega	Incêndio seguido de explosão de um tanque de amônia com danos materiais.	0/0
1978	Londres Inglaterra	Vazamento de amônia de uma fábrica de sorvetes.	0/0
1980	Cidade do México México	Vazamento tóxico de amônia em um terminal de carregamento.	9/28
1989	Jonova Lituânia	Explosão interna, incêndio e vazamento de amônia.	7/Não Disponível

• **Acidentes envolvendo GLP, propano e butano**

Na Tabela 3.2 são apresentados os acidentes mais significativos ocorridos no mundo, envolvendo com GLP, propano e butano, no período de 1943 a 1996 [12, 13, 16].

Pode-se observar que os acidentes com GLP, propano e butano envolveram um maior número de vítimas, quando comparados aos demais acidentes ocorridos com outras substâncias apresentadas neste item. Estes acidentes atingiram, na maioria das vezes, um raio de destruição significativo, acarretando prejuízos elevados e exigindo a remoção de muitas pessoas. Grande parte dos vazamentos foram seguidos de explosão e incêndios incontroláveis, que duraram até que todo o combustível fosse consumido.

Tabela 3.2 - Alguns acidentes ocorridos no mundo, envolvendo GLP, propano e butano, no período de 1943 a 1996 [12, 13, 16].

Ano	Local	Resumo do Acidente	Mortos/Feridos
1943	Califórnia EUA	Liberação de butano seguida de explosão.	5/Não Disponível
1951	Illinois EUA	Liberação de butano, sem ignição.	0/Não Disponível
1951	New Jersey EUA	Vazamento, incêndio e explosão de propano de uma tubulação rompida em área de estocagem. 70 tanques foram danificados ou destruídos.	0/11
1952	Newark EUA	Explosão não confinada de uma nuvem de propano.	Não Disponível
1955	Califórnia EUA	Vazamento e explosão de butano no processamento de gasolina.	Não Disponível
1957	Quebec Canadá	Vazamento e explosão de um tanque esférico de estocagem de butano.	1/Não Disponível
1958	Oklahoma EUA	Explosão de propano em uma refinaria.	0/1
1958	Michigan EUA	Ruptura de tanque de estocagem de butano, seguida de explosão de gases.	1/ Não Disponível
1959	Geórgia EUA	Incêndio e explosão de GLP.	23/Não Disponível
1962	New York EUA	Vazamento e explosão de um tanque de GLP.	10/17

Tabela 3.2 - Alguns acidentes ocorridos no mundo, envolvendo GLP, propano e butano, no período de 1943 a 1996. (continuação)

Ano	Local	Resumo do Acidente	Mortos/Feridos
1965	Louisiana EUA	Vazamento de propano no processamento de etileno.	0/12
1966	Feyzin França	Vazamento de propano de uma válvula que o operador não conseguiu fechar, seguido da explosão de uma tanque esférico de armazenamento.	21/52
1967	Argentina	Incêndio de propano com destruição de 400 casas.	0/100
1968	Alaska EUA	Explosão de GLP.	Não Disponível/2
1969	Repesa Espanha	Vazamento e incêndio de GLP com duração de seis dias.	0/0
1970	Missouri EUA	Explosão de uma nuvem, de propano equivalente a 45 ton de TNT.	0/1
1970	Hull Inglaterra	Incêndio de propano.	2/ Não Disponível
1970	Survey Inglaterra	Explosão de propano com danos a residências.	Não Disponível
1972	Rio de Janeiro Brasil	Vazamento de GLP de uma válvula que o operador não conseguiu fechar, seguido da explosão um tanque esférico de armazenamento.	38/75
1972	Montana EUA	Explosão de butano.	1/1
1972	W. Virginia EUA	Incêndio de propano.	21/20
1973	New York EUA	Explosão de GLP.	40/Não Disponível
1974	Flórida EUA	Explosão de propano.	0/0
1974	Mississippi EUA	Explosão de butano.	0/24
1975	Louisiana EUA	Vazamento de 270 ton de propano, sem explosão.	0/0
1977	Quatar	Explosão de GLP provocando danos a grandes distâncias, em vilas distantes e levando ao fechamento de um aeroporto.	7/Muitos
1977	Cassino Itália	Explosão de propano e butano.	1/9

Tabela 3.2 - Alguns acidentes ocorridos no mundo, envolvendo GLP, propano e butano, no período de 1943 a 1996. (continuação)

Ano	Local	Resumo do Acidente	Mortos/Feridos
1977	Puebla México	Incêndio em uma nuvem de vapor de propano provocado por um acidente em uma dutovia.	Não Disponível
1977	Ruff Creeck EUA	Incêndio em uma nuvem de vapor de propano provocado por um acidente em uma dutovia.	2/Não Disponível
1977	Umm Said Quatar	Incêndio com GLP em planta de gás.	7/Mais de 13
1978	Abqaiq Arábia Saudita	Explosão de uma nuvem de vapor de GLP em planta de gás.	Não Disponível
1978	Conway EUA	Explosão de GLP em uma estação de bombeamento.	Não Disponível
1978	Denver EUA	Explosão de uma nuvem de vapor de propano em unidade de polimerização.	3/Não Disponível
1978	Donnellson EUA	Bola de fogo de GLP provocada por um acidente em uma dutovia.	3/2
1978	Cidade do Texas EUA	BLEVE de GLP provocado por um acidente com vaso de estocagem.	7/10
1979	Linden EUA	Incêndio de nuvem de vapor de GLP em unidade de craqueamento.	Não Disponível
1979	Orange EUA	Explosão de GLP provocado por um acidente em uma dutovia.	1/1
1979	Cidade do Texas EUA	Explosão de nuvem de vapor de propano provocado por um acidente em unidade de alquilação.	Não Disponível
1979	Ypsilant EUA	Explosão de nuvem de vapor de propano provocado por um acidente com vaso de estocagem.	Não Disponível
1980	Enschede Holanda	Explosão de nuvem de vapor de propano.	Não Disponível
1980	Longport Inglaterra	Incêndio e explosão de GLP e de outras substâncias armazenadas.	Não Disponível
1980	Ortuella Espanha	Explosão de propano provocada por um acidente em vaso de estocagem.	51/Não Disponível
1980	Wealdstone Inglaterra	Vazamento de propano provocado por um acidente em vaso de estocagem.	0/1
1981	Gothenburg Suécia	Explosão de nuvem de vapor de propano provocada por um acidente em dutovia.	1/2

Tabela 3.2 - Alguns acidentes ocorridos no mundo, envolvendo GLP, propano e butano, no período de 1943 a 1996. (continuação)

Ano	Local	Resumo do Acidente	Mortos/Feridos
1981	San Rafael Venezuela	Explosão de GLP provocada por um acidente em uma dutovia.	18/35
1983	West Odessa EUA	Explosão e incêndio de GLP provocada por um acidente em uma dutovia.	6/Não Disponível
1984	Cidade do México México	Incêndio de nuvem de vapor e BLEVE de GLP em um terminal.	~650/~6.400
1984	Romeoville EUA	Explosão de uma nuvem de vapor e BLEVE de propano provocada por um acidente em coluna de absorção.	15/22
1985	Wood River EUA	Incêndio de nuvem de vapor de propano em unidade de desasfaltagem e deceragem.	Não Disponível
1987	Ras Tanuria Arábia Saudita	Explosão de nuvem de vapor em planta de gás.	Não Disponível
1988	Port Arthur EUA	Incêndio de propano em uma unidade de estocagem.	Não Disponível
1989	Baton Rouge EUA	Explosão de nuvem, de vapor de propano/etano, em refinaria.	Não Disponível
1989	Minnebeavo União Soviética	Explosão de nuvem de propano em planta de gasolina.	4/Não Disponível
1989	Pasadena EUA	Explosão de nuvem de vapor de isobutano em uma planta de propileno.	23/~103
1990	Bombain Índia	Explosão de nuvem de vapor de propano/etano em planta de etileno.	31/Não Disponível
1990	North Blenheim EUA	Explosão de nuvem de vapor de propano provocada por um acidente em uma dutovia.	2/7
1990	Porto Leixhos Portugal	Explosão de nuvem de vapor de propano provocada por um acidente em uma unidade de desasfaltagem.	Não Disponível
1990	Warren EUA	Explosão de GLP.	Não Disponível
1990	Pajaritos México	Explosão de nuvem de vapor de propano provocada por um acidente em uma planta de cloreto de vinila.	3/Não Disponível

• **Acidentes envolvendo hidrogênio**

Na Tabela 3.3 são apresentados alguns acidentes ocorridos, no mundo, com hidrogênio, no período de 1937 a 1996 [12, 13, 16]. Pode-se observar que o número de acidentes ocorridos com hidrogênio é reduzido em comparação com os demais apresentados. Apesar de ter uma larga faixa de inflamabilidade, o hidrogênio é um gás bastante leve e, ao ocorrer um vazamento, ele sofre uma rápida expansão e se dispersa no ambiente externo, não atingindo o seu limite inferior de inflamabilidade (apesar de ser bastante baixo: 4,1% [10]). Esta é a principal razão pela qual o número de acidentes envolvendo explosões e incêndios com hidrogênio em áreas, não confinadas, é pequeno. Alguns ocorreram devido à presença simultânea de alguns hidrocarbonetos.

Tabela 3.3 - Alguns acidentes ocorridos no mundo, com hidrogênio, no período de 1937 a 1996 [12, 13, 16].

Ano	Local	Resumo do Acidente	Mortos/Feridos
1937	EUA	Ruptura de um dirigível com liberação de hidrogênio seguida de explosão.	36/Não Disponível
1964	Nevada EUA	Explosão de 71 kg de hidrogênio equivalente a 27 kg de TNT, liberados durante a realização de um experimento.	0/0
1970	New Jersey EUA	Explosão de uma nuvem de hidrogênio e hidrocarboneto exauridos de um reator.	0/40
1972	Holanda	Explosão de hidrogênio.	4/4
1975	Califórnia EUA	Explosão de hidrogênio.	0/2
1975	Alemanha	Explosão de hidrogênio e nafta.	0/4
1977	Índia	Explosão de hidrogênio.	0/20
1982	Fort MacMurray Canadá	Incêndio de hidrogênio provocado por um acidente em compressor.	Não Disponível
1984	Sarnia Canadá	Explosão de uma nuvem de vapor de hidrogênio em uma planta de benzeno.	2/Não Disponível
1987	Grangemouth Inglaterra	Incêndio de hidrogênio provocado por um acidente em vaso separador.	Não Disponível
1987	Mississauga Canadá	Incêndio de hidrogênio e hidrocarbonetos em unidade de tratamento de água.	Não Disponível
1989	Martinez EUA	Incêndio e explosão de hidrogênio e hidrocarbonos em unidade de tratamento de água.	Não Disponível
1989	Richmond EUA	Incêndio de hidrogênio em uma refinaria.	Não Disponível
1992	Sodegaura Japão	Explosão de nuvem de vapor de hidrogênio em refinaria.	10/7

• **Acidentes envolvendo hexafluoreto de urânio, dióxido de urânio, fluoreto de uranila e ácido fluorídrico**

Na Tabela 3.4 são apresentados alguns acidentes envolvendo hexafluoreto de urânio (UF_6), dióxido de urânio (UO_2), fluoreto de uranila (UO_2F_2) e ácido fluorídrico (HF), ocorridos em instalações nucleares, no período de 1944 a 2000 [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25].

Pode-se observar na Tabela 3.4, a presença de UF_6 nos eventos que causaram maiores danos. Devido à toxicidade química e radiológica do UF_6 e seus produtos de hidrólise (HF e UO_2F_2), os eventos envolvendo estas substâncias provocaram edema pulmonar e danos nos rins dos trabalhadores expostos. As pessoas mortas ou feridas nestes acidentes eram trabalhadores que se encontravam próximos ao ponto de liberação.

Tabela 3.4 - Alguns acidentes ocorridos no mundo, com hexafluoreto de urânio (UF_6), dióxido de urânio (UO_2), fluoreto de uranila (UO_2F_2) e ácido fluorídrico (HF), no período de 1944 a 2000 [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25].

Ano	Local	Resumo do Acidente	Mortos/Feridos
1944	Filadélfia EUA	Ruptura ou explosão de um tanque com vazamento de 200 kg de UF_6 juntamente com vapor d'água.	2/16
1960	Pensilvânia EUA	Vazamento em um trocador de calor com liberação de UO_2F_2 para um rio, com concentração 60 vezes acima do limite máximo permissível na descarga.	Não Disponível
1960	Tennessee EUA	Ruptura de um cilindro de 10 ton de UF_6 em uma planta de enriquecimento de urânio.	Não Disponível
1963	Massachusetts EUA	Incêndio em um filtro com liberação de urânio enriquecido.	0/0
1966	Ohio EUA	Remoção acidental de uma válvula de um cilindro de 10 ton aquecido provocou vazamento de 2.300 kg de UF_6 em uma hora, grande parte contida por borrafo de água.	0/1
1967	Oklahoma EUA	Vazamento de 45 kg de UF_6 em uma planta de conversão, em 15 a 20 minutos, de uma junta devido a superaquecimento.	0/0

Tabela 3.4 - Alguns acidentes ocorridos no mundo, com hexafluoreto de urânio (UF_6), dióxido de urânio (UO_2), fluoreto de uranila (UO_2F_2) e ácido fluorídrico (HF), no período de 1944 a 2000. (continuação)

Ano	Local	Resumo do Acidente	Mortos/Feridos
1968	Oklahoma EUA	Vazamento de 45 kg de UF_6 enriquecido, em 15 a 20 minutos, através de uma válvula deixada aberta acidentalmente durante o aquecimento do cilindro.	0/0
1968	Illinois EUA	Falha de válvula com vazamento de 43 kg de UF_6 em planta de conversão.	0/0
1971	Carolina do Norte EUA	Dois cilindros de UF_6 não enriquecido caíram durante o transporte e um deles foi atingido por um trem. Houve pequeno vazamento de UF_6 que se auto selou pela formação de UO_2F_2 no ponto de vazamento.	0/0
1973	Pensilvânia EUA	Deficiência na lavagem de gases devido à corrosão no injetor do lavador de gases levando à liberação de urânio enriquecido.	0/0
1973	Tennessee EUA	Operador quebrou a válvula de um cilindro de 10 ton com vazamento de 100 kg de UF_6 em 20 minutos.	0/0
1973	Pensilvânia EUA	Ventilação inadequada do forno de calcinação permitiu escape de urânio pela exaustão. Necessidade de descontaminação externa.	0/0
1973	Ohio EUA	Entrada de óleo na linha de instrumentação da linha de UF_6 , formou compostos sólidos de urânio nas tubulações.	0/0
1974	Carolina do Sul EUA	Vazamento em filtro levou à descarga de UO_2 diretamente para o ar.	0/0
1975	Pensilvânia EUA	Falha no lavador de gases e no sistema de ventilação levou ao vazamento de urânio enriquecido.	0/0
1975	EUA	Explosão e incêndio durante o processo de conversão de nitrato de uranila líquido em óxido de urânio sólido.	0/2

Tabela 3.4 - Alguns acidentes ocorridos no mundo, com hexafluoreto de urânio (UF_6), dióxido de urânio (UO_2), fluoreto de uranila (UO_2F_2) e ácido fluorídrico (HF), no período de 1944 a 2000. (continuação)

Ano	Local	Resumo do Acidente	Mortos/Feridos
1977	Pierrelatte França	Manuseio inadequado de um cilindro aquecido a 95°C levou à ruptura de sua válvula provocando a liberação de 7.106 kg de UF_6 em aproximadamente 11 minutos.	0/0
1978	Ohio EUA	Queda e ruptura de um cilindro aquecido de 14 ton em planta de enriquecimento de urânio, com vazamento de 9.500 kg de UF_6 entre 30 minutos e 1 hora.	0/0
1978	Oklahoma EUA	Liberação acidental de 750 kg de urânio natural na forma de nitrato de uranila para um rio. Contaminação de 1,4 vezes a concentração máxima permissível, diluída no rio.	0/0
1979	Tennessee EUA	Alívio acidental de um cilindro para exaustão, com vazamento inferior a 3 kg de UF_6 em planta de fabricação de elementos combustíveis para reatores nucleares.	0/0
1980	EUA	Falha em flange de acoplamento com vazamento inferior a 1 kg de UF_6 em planta de fabricação de elementos combustíveis para reatores nucleares.	0/0
1981	EUA	Vazamento inferior a 74 kg de UF_6 , através de uma junta, em uma instalação de fabricação de elementos combustíveis para reatores nucleares.	0/0
1981	Tennessee EUA	Erro na manutenção levou à falha de um compressor e à reação de UF_6 com metal, formando compostos sólidos de urânio.	0/0
1981	Illinois EUA	Sobreenchimento de um cilindro com 537 kg a mais do que o permissível. Nenhum dano na retirada do UF_6 excedente.	0/0
1981	Califórnia EUA	Explosão de uma solução contendo urânio.	0/0

Tabela 3.4 - Alguns acidentes ocorridos no mundo, com hexafluoreto de urânio (UF_6), dióxido de urânio (UO_2), fluoreto de uranila (UO_2F_2) e ácido fluorídrico (HF), no período de 1944 a 2000. (continuação)

Ano	Local	Resumo do Acidente	Mortos/Feridos
1982	Washington EUA	Vazamento em uma válvula levou à hidrólise de 10 kg de UF_6 em um lavador de gases.	0/0
1982	Connecticut EUA	Incêndio de UO_2 na forma de pó, na cobertura de uma centrífuga de água de rejeitos, durante a secagem por evaporação de material contaminado.	0/0
1982	Tennessee EUA	Liberação de UF_6 para a atmosfera do prédio.	0/0
1982	EUA	Vazamento inferior a 25 kg de UF_6 através de uma junta, em instalação de fabricação de elementos combustíveis para reatores nucleares.	0/0
1983	Carolina do Norte EUA	Ruptura de uma tubulação flexível levou à liberação de UO_2 na área de trabalho.	0/0
1984	Illinois EUA	Superaquecimento de um cilindro com 2.470 kg a mais do que o permitido. Cilindro sofreu deformação durante a retirada do UF_6 excedente.	0/0
1985	Pirrelatte França	Vazamento de 400 kg de UF_6 em poucos minutos, devido a uma falha na válvula do dessublimador.	0/1
1985	Illinois EUA	Superaquecimento de um cilindro com 970 kg a mais do que o permitido. Nenhum dano na retirada do UF_6 excedente.	0/0
1986	Oklahoma EUA	Superaquecimento de um cilindro com 620 kg a mais do que o permitido, provocado pelo erro de cálculo no tempo de enchimento (operador esqueceu de descontar o peso do cilindro vazio). Nenhum dano ocorreu na retirada do UF_6 excedente.	0/0
1986	Oklahoma EUA	Aquecimento de um cilindro com superenchimento provocando o vazamento de 14.000 kg de UF_6 em menos de 1 minuto.	1/Muitos

Tabela 3.4 - Alguns acidentes ocorridos no mundo, com hexafluoreto de urânio (UF_6), dióxido de urânio (UO_2), fluoreto de uranila (UO_2F_2) e ácido fluorídrico (HF), no período de 1944 a 2000. (continuação)

Ano	Local	Resumo do Acidente	Mortos/Feridos
1987	Pierrelatte EUA	Vazamento para o meio ambiente de 1.200 kg de UF_6 pela válvula de um cilindro.	0/0
1987	Hanau Alemanha	Vazamento de 50 kg de UF_6 durante o reparo da válvula principal da autoclave (válvula de um cilindro dentro da autoclave não fechou totalmente).	0/0
1989	Vasteras Suécia	Liberação de pó de urânio de um forno de conversão para o sistema de lavagem de gases.	0/0
1989	Montreal Canadá	Armazenamento incorreto de cilindros vazios de UF_6 em um navio, levou à contaminação de outras cargas após um temporal, que provocou a ruptura e cisalhamento de suas válvulas e dos contêineres a bordo.	0/0
1990	Hanau Alemanha	Explosão de um lavador de gases no tratamento de rejeitos de uma fábrica de elementos combustíveis para reatores nucleares.	0/2
1992	Sequoyah Fuel EUA	Vazamento de pequena quantidade de UF_6 empobrecido no prédio de produção de UF_4 .	Não Disponível
1994	Westinghouse Fuel EUA	Vazamento de UF_6 .	0/0

• **Acidentes investigados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América - EPA**

Na Tabela 3.5 é apresentada uma compilação dos acidentes referentes às investigações realizadas pela Equipe de Investigação de Acidentes Críticos, da EPA [24].

Tabela 3.5 - Acidentes investigados pela EPA, no período de 1994 a 1998 [24].

Ano	Local	Resumo do Acidente	Mortos/Feridos
1994	Iowa EUA	Explosão de uma unidade de nitrato de amônia. Foram liberadas cerca de 5.700 ton de amônia anidra e 25.000 galões de ácido nítrico. Foi feita a evacuação em um raio de 24 km da instalação. A liberação de ácido nítrico provocou a contaminação do lençol subterrâneo.	4/18
1995	Geórgia EUA	Envolvimento de sulfato de terebentina bruto em um incêndio. A liberação de sulfeto de hidrogênio no acidente levou à remoção de 2.000 pessoas próximas ao local (durante 30 dias para algumas pessoas). A água em um pântano adjacente foi altamente contaminada.	0/0
1995	New Jersey EUA	Misturador contendo hidrossulfito de sódio, pó de alumínio, carbonato de potássio e aldeído benzóico explodiu dando origem a um incêndio de grande proporção	5/Muitos
1995	Pennsylvania EUA	Fogo e explosão em tanques de armazenamento que continham hidrocarbonetos inflamáveis. Empregados da instalação e pessoas residentes próximos ao local do acidente foram removidas.	5/1
1997	Califórnia EUA	Envolvimento de hidrocarboneto em fogo e explosão. Moradores próximos ao local do acidente foram abrigados em suas próprias residências.	1/44
1997	Oklahoma EUA	Envolvimento de resíduos de tintas, óleos, thinners e solventes de limpeza em fogo e explosão. Uma estrada próxima foi interditada. Pessoas em um raio de cerca de 2,5 km ao redor da instalação foram removidas.	1/2

Tabela 3.5 - Acidentes investigados pela EPA, no período de 1994 a 1998.
(continuação)

Ano	Local	Resumo do Acidente	Mortos/Feridos
1997	New York EUA	Falha em tanque de armazenamento provocou o derramamento de grande volume de ácido clorídrico. Houve acúmulo de nuvem de ácido clorídrico fora da instalação. O líquido derramado entrou na rede de recolhimento de água pluvial da cidade. Foi necessária a evacuação de um quarteirão ao redor da instalação.	0/43
1997	Arkansas EUA	Explosão e fogo envolvendo vários pesticidas. Uma área de aproximadamente 5 km de raio foi evacuada.	3/20
1997	Texas EUA	Explosão e fogo envolvendo hidrocarboneto em unidade de olefina. Moradores próximos ao local do acidente foram abrigados em suas próprias residências. As rodovias a oeste e sul da instalação foram fechadas durante algumas horas. Danos a janelas de residências próximas foram registrados.	0/20 a 30
1997	Indiana EUA	Fogo e explosão envolvendo óxido de etileno. Cerca de 2.500 pessoas foram removidas num raio de aproximadamente 2 km ao redor da instalação.	1/62
1997	Ohio	Explosão de caldeira de fenol/formaldeído. Quinze residências foram evacuadas.	1/13
1998	New Jersey EUA	Explosão e fogo envolvendo uma caldeira durante a fabricação de Amarelo 96, corante de combustível. As substâncias químicas envolvidas foram o-cloronitrobenzeno e 2-etilhexamina. A explosão liberou resíduos químicos que atingiram a comunidade. A água utilizada no combate ao incêndio, que ficou contaminada, foi coletada e retida no local.	0/9
1998	Maryland EUA	Ocorrência de explosão e fogo quando os trabalhadores estavam esvaziando um reator que continha cloreto de alumínio.	0/8

• **Acidentes envolvendo criticalidade**

Na Tabela 3.6 é apresentada uma compilação dos acidentes de criticalidade ocorridos na indústria nuclear, no mundo, entre 1953 e 2000. Pode-se observar que neste período ocorreram 22 eventos em instalações do ciclo do combustível nuclear, ocasionando a morte de 9 pessoas e irradiação em mais de 50. Uma particularidade interessante é que dos 22 eventos, 21 ocorreram em soluções líquidas de material fissil.

Esses acidentes mostraram ter como principais causas uma política de segurança mau definida ou mau implementada, problemas gerenciais e administrativos e a falta de comprometimento individual dos operadores com as questões de segurança.

Tabela 3.6 - Acidentes de criticalidade ocorridos no mundo, no período de 1953 a 2000 [26].

Ano	Local	Nº de Fissões	Mortos/Feridos
1953	Mayak Production Association - Rússia	$2,5 \times 10^{17}$	2/0
1957	Mayak Production Association - Rússia	$2,0 \times 10^{17}$	1/5
1958	Mayak Production Association - Rússia	$2,3 \times 10^{17}$	3/1
1958	Oak Ridge Y-12 Plant - EUA	$1,3 \times 10^{18}$	0/8
1958	Los Alamos Scientific Labotatoty - EUA	$1,5 \times 10^{17}$	1/0
1959	Idaho Chemical Processing Plant - EUA	$2,5 \times 10^{19}$	0/0
1960	Mayak Production Association - Rússia	$2,3 \times 10^{17}$	0/Vários
1961	Idaho Chemical Processing Plant - EUA	$6,0 \times 10^{17}$	0/0
1961	Siberian Chemical Combine - Rússia	$1,0 \times 10^{16}$	0/1
1962	Hanford Works - EUA	$8,0 \times 10^{17}$	0/3
1962	Mayak Production Association - Rússia	$2,0 \times 10^{17}$	Não Disponível
1963	Siberian Chemical Combine - Rússia	$8,0 \times 10^{17}$	0/4
1963	Siberian Chemical Combine - Rússia	$2,0 \times 10^{17}$	0/0
1964	United Nuclear Fuels recovery Plant - EUA	$1,0 \times 10^{17}$	1/2
1965	Electrostal Machine Building Plant - Rússia	$1,0 \times 10^{15}$	0/1
1965	Mayak Production Association - Rússia	$7,0 \times 10^{17}$	Não Disponível
1968	Mayak Production Association - Rússia	$5,0 \times 10^{16}$	1/1
1970	Windsacale Works - Inglaterra	$1,0 \times 10^{15}$	0/0
1978	Idaho Chemical Processing Plant - EUA	$3,0 \times 10^{18}$	0/0
1978	Siberian Chemical Combine - Rússia	$3,0 \times 10^{15}$	0/8
1997	Novosibirsk Chemical Concentration Plant - URSS	$1,0 \times 10^{16}$	Não Disponível
1999	JCO Fuel Fabrication Plant - Japão	$1,0 \times 10^{18}$	2/22

3.4. Análise de Consequência de Acidentes

Existem disponíveis no mercado vários *softwares* desenvolvidos especialmente para cálculo das consequências de acidentes. Porém, a dificuldade maior de uma análise de risco é a determinação do cenário em que o acidente se desenvolve (causa do acidente, termo fonte, quantidade de material, condições de liberação, etc.), e a seleção do modelo adequado para cálculo de suas consequências. Os acidentes típicos em instalações industriais de processamento químico e nuclear envolvem incêndios, explosões e liberação de materiais tóxicos para a atmosfera e interiores de prédios. Para a realização deste trabalho foi feita uma revisão bibliográfica dos modelos de cálculo de consequência disponíveis na literatura e selecionados os modelos mais conservativos, os quais são apresentados a seguir.

3.4.1. Diâmetro de uma bola de fogo

Para se ter uma idéia inicial do alcance de um incêndio, isto é, das possíveis áreas afetadas por este acidente, um parâmetro bastante utilizado é o diâmetro da bola de fogo (*fireball*). A estimativa deste parâmetro para um incêndio envolvendo um material combustível líquido, utilizado para avaliações preliminares das consequências de um incêndio, pode ser feita utilizando-se a seguinte fórmula empírica [27]:

$$D_b = 3,85 \times M^{1/3} \quad (3.1)$$

onde:

D_b = diâmetro da bola de fogo [m] e

M = massa de material combustível [kg].

Para o cálculo de concentrações de materiais sólidos ou voláteis, carreados pela fumaça, a várias distâncias do local do acidente, é necessária a estimativa da fração do inventário liberada em forma de aerossóis. Este valor depende da magnitude e duração do incêndio e das formas física e química do material envolvido. No caso de acidentes envolvendo incêndios em instalações radioativas, tomando como base testes experimentais exaustivos realizados com materiais nucleares, são recomendadas frações de liberações de 0,003 % para soluções nítricas e orgânicas de U e Th e de 0,05 % para óxidos de U e Th (na forma de pó e pastilhas) e urânio metálico [28].

3.4.2. Explosão de líquido e sólido

Para a avaliação da influência em outras instalações, de uma possível explosão em vias de transportes ou em uma instalação que utiliza, processa ou armazena material explosivo, é freqüentemente utilizado o critério de distância mínima de segurança (distância onde a sobrepressão provocada por uma possível explosão do material alcança 1 psi) [29]. A estimativa deste parâmetro pode ser feita, utilizando-se a seguinte fórmula empírica [29, 30]:

$$d = \bar{d} \times W^{1/3} \quad (3.2)$$

onde:

d = distância mínima de segurança [m];

$\bar{d}$ = distância normalizada [$\text{m/kg}^{1/3}$] e

W = massa equivalente do material combustível, em kg de TNT.

O valor de $\bar{d}$ obtido para uma sobrepressão da de 1,0 psi é de aproximadamente $18 \text{ m/kg}^{1/3}$.

A equação para obter a distância mínima de segurança, d , é também útil para estimar a sobrepressão a uma dada distância do local da explosão em função da quantidade de material explosivo, calculando o valor de $\bar{d}$ e obtendo o valor da sobrepressão na Figura 3.1. O efeito da sobrepressão em edificações, pessoas e materiais é apresentado na Tabela 3.7.

Para estimar o valor do equivalente em TNT, $Eq.TNT$, além de uma relação entre o calor de combustão do material considerado, e o calor de combustão do TNT (4680 kJ/kg) é necessário considerar-se a eficiência da explosão, η (tipicamente 10 %):

$$Eq.TNT = \frac{\eta \times \Delta H_c}{4680} [\%] \quad (3.3)$$

Para líquidos e sólidos tem-se:

$$W = \frac{M \times Eq.TNT}{10^2} [\text{kg}] \quad (3.4)$$

onde:

ΔH_c = calor de combustão e

M = massa do material combustível [kg].

Da mesma forma que no caso de incêndio, se estiver envolvido algum material tóxico na explosão, para o cálculo das concentrações, destes materiais, a várias distâncias da explosão, é necessária a estimativa da fração do inventário liberado na forma de aerossóis. Por exemplo, os valores recomendados para explosão envolvendo óxidos de U e Th (pó e pastilhas) é de 0,05%, para urânio metálico é de 0% e para soluções nítricas e orgânicas de U e Th, é de 0,003% [28].

Nos casos onde for provável a ocorrência de incêndio após a explosão, o cálculo das concentrações deve considerar, de forma conservativa, a liberação simultânea das frações de liberação para ambos os casos.

Tabela 3.7 - Efeitos devidos à sobrepressão oriunda de explosões [31].

Sobrepressão [psi]	Efeitos observados	Resultado [%]	
		Mortes	Feridos
0,3	Danos em 10% de vidraças	0	0
1,0	Avaria em casas, quebra de 100 % de vidraças	0	0
2,8	Destruição de paredes de concreto sem ferragem, morte de 1% das pessoas expostas	1	10
3,5	Colapso de estruturas de aço, 90 % de perfuração do tímpano e morte de 5% das pessoas expostas	5	90
5,0	Destruição de edificações e morte de 10 % das pessoas expostas	10	90
15,0	Morte de 100 % das pessoas expostas	100	0

3.4.3. Explosão de nuvem de vapor (*vapor cloud explosion*)

Quando uma grande quantidade de substância inflamável, líquido vaporizado ou gás, é liberada, há a formação de uma nuvem de vapor que tende a se dispersar no ar. Se esta nuvem sofrer uma ignição antes de alcançar o limite inferior de flamabilidade ocorrerá uma explosão desta nuvem de vapor (*vapor cloud explosion*) ou um incêndio da mesma

(*flash fire*). No caso da ocorrência da explosão da nuvem a consequência principal será a sobrepressão gerada. Ocorrendo incêndio desta nuvem as maiores consequências serão devidas ao contato direto com a chama e à exposição à radiação térmica.

Para cálculos conservativos de liberações de gases e líquidos voláteis inflamáveis considera-se que a nuvem de vapor é formada pela quantidade total da substância inflamável, que todo o conteúdo da nuvem está dentro do limite de inflamabilidade e que, aí então, ocorre a explosão da nuvem.

Um método utilizado para o cálculo da sobrepressão gerada pela explosão de uma nuvem de vapor, a várias distâncias, é o sugerido pela referência [32]. Neste método a massa equivalente em TNT é relacionada com a quantidade total de combustível na nuvem e seu desenvolvimento segue os seguintes passos:

a) determina-se a fração de ignição (f_i) através da seguinte equação:

$$f_i = 1 - \exp\left[\frac{-C_p \times \Delta T}{C_L}\right] \quad (3.5)$$

onde:

f_i = fração de ignição;

C_p = calor específico [kJ/kg.K];

ΔT = diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura de ebulição, à pressão ambiente [K] e

C_L = calor latente de vaporização [kJ/kg].

b) considera-se a massa de combustível na nuvem (M_n) como sendo:

$$M_n = M_l \times f_i \times 2 \quad (3.6)$$

onde:

M_n = massa de combustível na nuvem [kg];

M_l = massa de combustível liberada [kg] e

2 = fator para considerar a formação de *spray* e aerossóis na nuvem.

Deve-se observar que a massa do combustível na nuvem não pode ser maior que a massa de combustível liberada:

c) calcula-se a massa equivalente do combustível na nuvem (W), em quilos de TNT, através da seguinte expressão:

$$W = F_e \times M_n \times \frac{\Delta H_C}{4680} \quad (3.7)$$

onde:

W = massa equivalente do material combustível, em kg de TNT [kg];

F_e = fator de rendimento para explosão de nuvem = 0,03;

ΔH_C = calor de combustão do combustível [kJ/kg];

4680 = calor de combustão do TNT [kJ/kg]

Na Figura 3.2 é apresentado um gráfico onde o pico da sobrepressão da frente da onda, produzida por uma detonação de TNT, é representado em função da distância normalizada ($\bar{d}$) [32]. Para identificar o pico da sobrepressão a uma distância real (d_r) do ponto de detonação da carga de TNT, procede-se da seguinte forma:

$$\bar{d} = \frac{d_r}{W^{1/3}} \quad (3.8)$$

onde:

$\bar{d}$ = distância normalizada [m/kg^{1/3}] e

d_r = distância real entre o material explosivo e o ponto de interesse [m].

Conhecida a distância normalizada $\bar{d}$, o pico da sobrepressão da frente da onda pode ser obtido diretamente do gráfico apresentado na Figura 3.1.

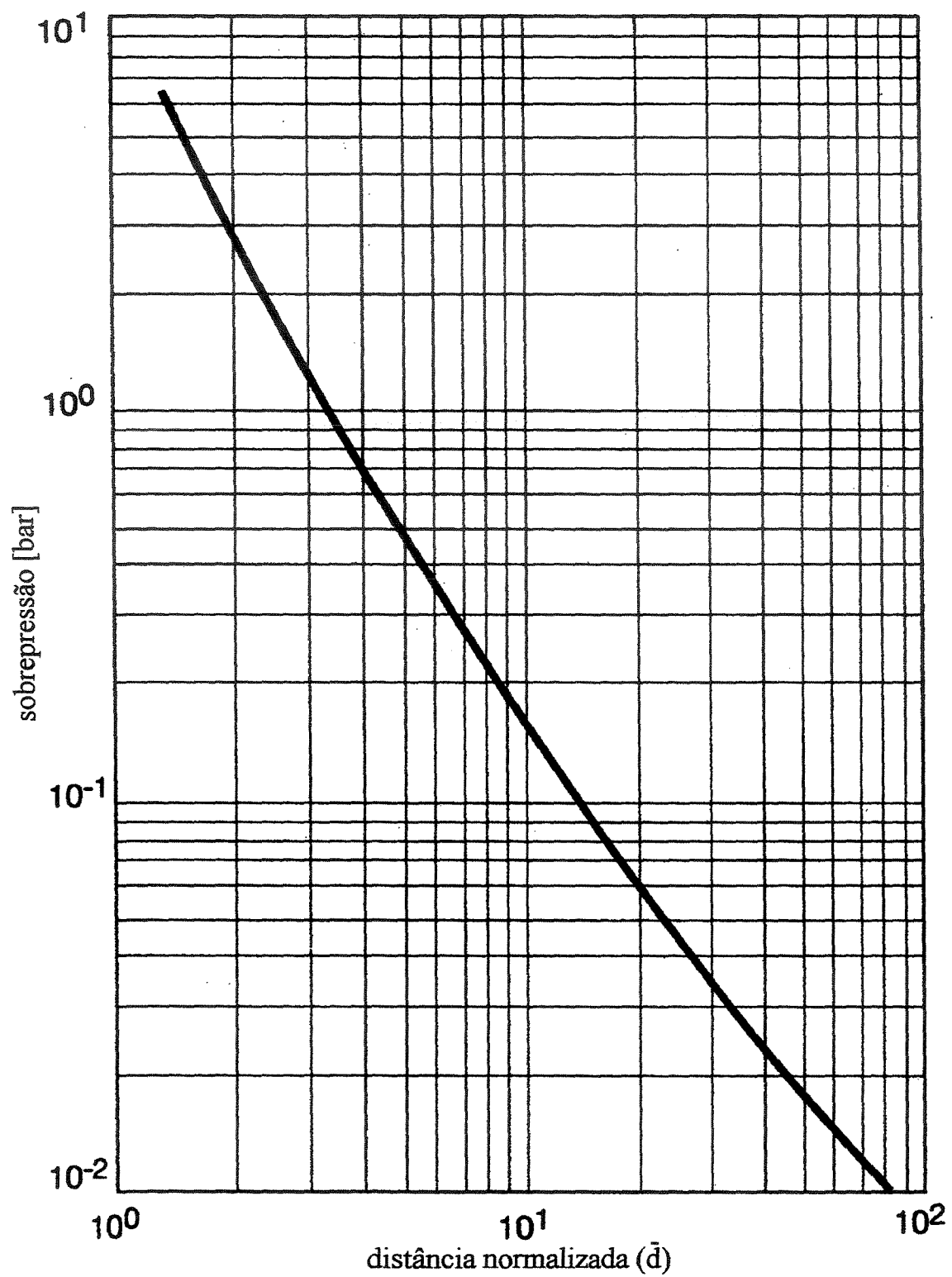


Figura 3.1 - Distância normalizada para detonação de cargas de TNT [32].

3.4.4. BLEVE e bola de fogo

O BLEVE, do inglês *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*, é o fenômeno de ruptura catastrófica de um reservatório contendo líquido sob pressão. Este fenômeno ocorre quando acontece a ruptura da parede do vaso sob pressão contendo líquido ou gás liqüefeito superaquecido, podendo gerar mísseis, i. e., fragmentos do vaso ou seus componentes, e bola de fogo. Neste trabalho é apresentado um método para se calcular os efeitos da bola de fogo resultante da liberação do líquido ou gás liqüefeito.

O modelo de Hymes para fonte pontual, utilizado para cálculo da radiação térmica recebida em ponto de interesse é representado pela seguinte equação [16, 32, 33, 34]:

$$E_r = \frac{2,2 \times \tau_a \times f_e \times \Delta H_C \times M_b^{2/3}}{4 \times \pi \times d_b^2} \quad (3.9)$$

onde:

E_r = fluxo térmico recebido no ponto de interesse [kW/m²];

τ_a = transmissividade atmosférica (conservativamente = 1 ou estimada através da expressão (3.23);

f_e = fração da energia total convertida em radiação térmica;

ΔH_C = calor de combustão do combustível [kJ/kg];

M_b = massa de combustível na bola de fogo [kg] e

d_b = distância entre o centro da bola de fogo e o ponto de interesse [m].

Hymes sugere os seguintes valores para a fração do calor de combustão irradiado [35]:

$f_e = 0,3$ para explosões abaixo da válvula de alívio de pressão de vasos e

$f_e = 0,4$ para explosões acima da válvula de alívio de pressão de vasos.

sendo:

$$d_b = \sqrt{d_h^2 + h_b^2} \quad (3.10)$$

$$h_b = 0,75 \times D_{b\max} \quad (3.11)$$

$$D_{b\max} = 5,8 \times M_b^{1/3} \quad (3.12)$$

onde:

d_h = distância horizontal entre o centro da bola de fogo e o ponto de interesse [m];

h_b = altura do centro da bola de fogo [m] e

$D_{b\max}$ = diâmetro máximo da bola de fogo [m].

Os efeitos da radiação térmica em uma pessoa dependem da intensidade da radiação e do tempo de exposição a esta radiação. A literatura [32] sugere, conservativamente, que o tempo de exposição seja considerado igual ao tempo de duração da bola de fogo (t_d), e apresenta as seguintes equações para a estimativa deste parâmetro:

- para massa de combustível menor que 30.000 kg

$$t_d = 0,45 \times M_b^{1/3} \text{ [s]} \quad (3.13)$$

- para massa de combustível igual ou maior que 30.000 kg

$$t_d = 2,6 \times M_b^{1/6} \text{ [s]} \quad (3.14)$$

Na Figura 3.2 são apresentados os níveis de danos e mortes devido à radiação térmica recebida por pessoas, em função do tempo de exposição.

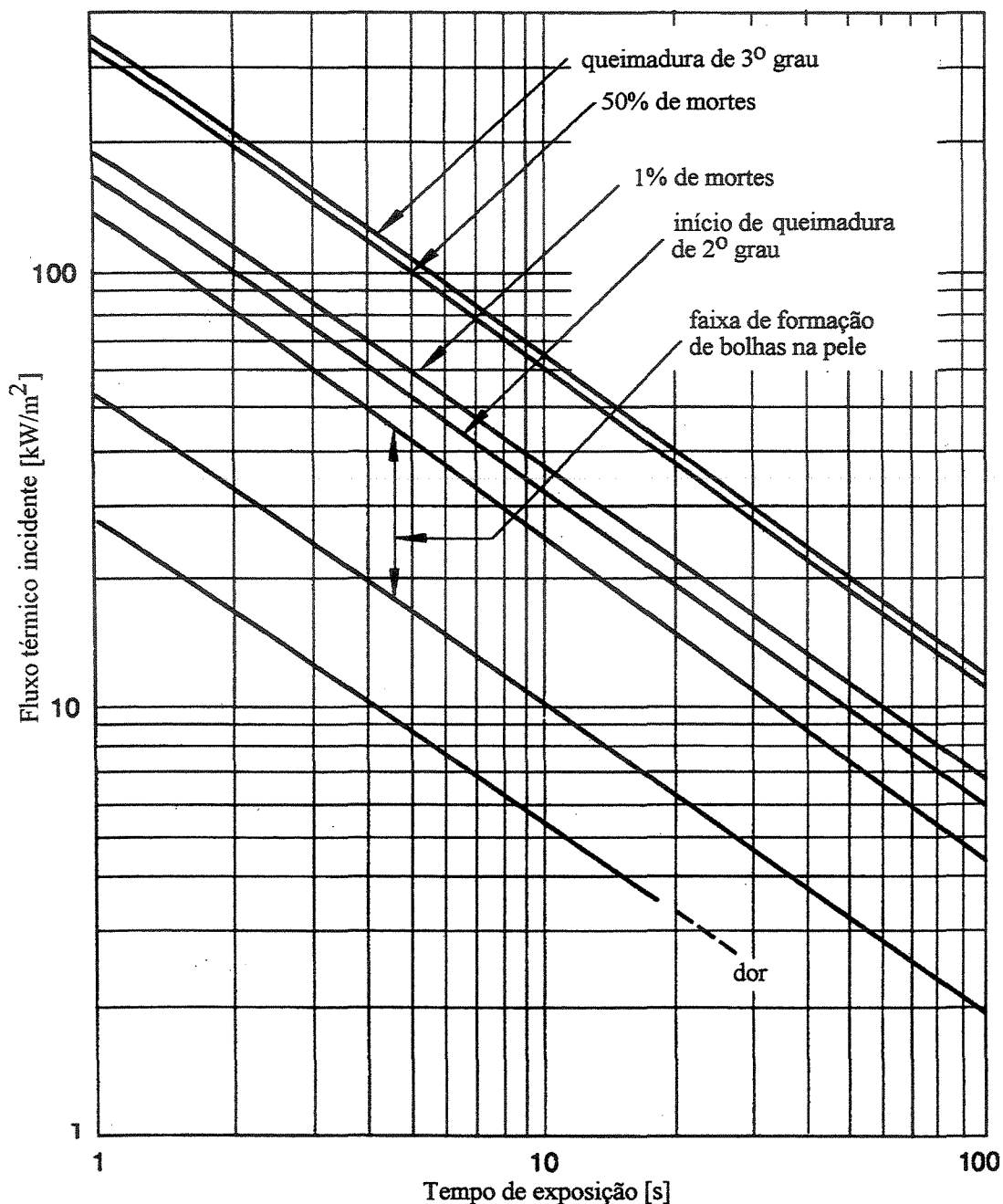


Figura 3.2 - Níveis de danos e mortes devido à radiação térmica recebida [32].

3.4.5. Incêndio em poça (*pool fire*)

O incêndio em poça ocorre numa poça de substância inflamável, oriunda de furo ou rompimento de tanques ou esferas de armazenagem, tubulações, etc., onde o produto é lançado ao solo e sob determinadas condições, se incendeia. A consequência deste fenômeno está mais relacionada com o efeito dominó e à segurança dos trabalhadores nas imediações da poça do que com o risco à comunidade.

De uma forma simplificada, a distância de segurança de separação entre pessoas e o local onde pode ocorrer o incêndio em poças pode ser estimada como sendo 3 a 5 vezes o diâmetro da poça, com base no “impacto térmico seguro” de $4,7 \text{ kW/m}^2$ [33], que é o valor de fluxo de radiação térmica que pode causar danos às pessoas após 30 segundos de exposição.

As referências [16, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41] apresentam modelos para cálculo do nível de radiação térmica proveniente de incêndio em poça. Estas referências apresentam modelos para fonte pontual compostos de alguns sub-modelos, tais como:

a) taxa de queima

Para poças com diâmetros maiores que um metro a taxa com que o nível da poça diminui pode ser estimada através da seguinte expressão [38]:

$$\dot{y}_{\max} = 1,27 \times 10^{-6} \times \frac{\Delta H_C}{\Delta H^*} \quad (3.15)$$

onde:

$\dot{y}_{\max}$ = taxa de decréscimo vertical máximo do nível da poça [m/s];

ΔH_C = calor de combustão do combustível [kJ/kg] e

ΔH^* = calor de vaporização modificado, no ponto de ebulição do líquido [kJ/kg].

O calor de vaporização modificado, no ponto de ebulição do líquido, pode ser estimado através da seguinte expressão:

$$\Delta H^* = \Delta H_v + \int_{T_a}^{T_e} C_p \times dt \quad (3.16)$$

onde:

ΔH_v = calor de vaporização [kJ/kg];

C_p = calor específico [kJ/kg.K];

T_e = temperatura de ebulição [K] e

T_a = temperatura ambiente [K].

A taxa de queima é determinada pela multiplicação da taxa de decréscimo vertical máxima pela massa específica do líquido, ou seja:

$$m_B = \dot{y}_{\max} \times \rho_l \quad (3.17)$$

onde:

m_B = taxa de queima [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$] e

ρ_l = massa específica do líquido [kg/m^3].

Se a massa específica do líquido não for conhecida a taxa de queima pode ser estimada através da seguinte expressão:

$$m_B = 1 \times 10^{-3} \times \frac{\Delta H_c}{\Delta H^*} \quad (3.18)$$

As expressões (3.15), (3.16), (3.17) e (3.18) são aplicáveis para o caso de incêndio em poças no solo. Estas mesmas expressões são aplicáveis em incêndio em poças na água, se o ponto de ebulição do líquido inflamável for acima da temperatura ambiente. Para líquidos com ponto de ebulição abaixo da temperatura ambiente a taxa de queima é aproximadamente três vezes o valor obtido para a taxa de queima no solo [39, 40].

b) tamanho da poça

Na maioria dos casos de incêndios em poça o tamanho da poça é determinado pela quantidade de líquido liberado e pelas barreiras físicas locais, tais como diques ou sistemas de drenagem.

Em vazamentos contínuos, em um plano infinito, o diâmetro máximo de uma poça é alcançado quando a taxa de decréscimo vertical do nível da poça multiplicada pela área da mesma for igual à vazão do líquido. Este diâmetro pode ser calculado através da seguinte expressão [33]:

$$D_{\max} = 2 \times \sqrt{\frac{R_l}{\pi \times \dot{y}}} \quad (3.19)$$

onde:

D_{max} = diâmetro máximo da poça [m] e

R_l = vazão do líquido [m^3/s].

$\dot{y}$ = taxa de decréscimo vertical do nível da poça [m/s];

Assume-se, normalmente, que as poças são circulares. No caso de diques com formas quadradas ou retangulares, deve-se utilizar um diâmetro equivalente [33].

No caso de vazamentos instantâneos no solo, o diâmetro máximo da poça, considerando sua profundidade como sendo um centímetro, pode ser estimado através da seguinte expressão:

$$D_{max} = 2 \times \sqrt{\frac{0,1 \times M_l}{\pi \times \rho}} \quad (3.20)$$

onde:

M_l = massa do combustível liberado [kg].

A expressão (3.20) considera que não há dique para contenção do líquido liberado ou que a área do dique é maior do que a área da poça.

c) altura da chama

Observações de incêndios em poça mostraram que existe uma relação próxima entre a altura da chama visível e o diâmetro da poça [33]. Esta relação pode ser estimada através da seguinte expressão [41]:

$$\frac{H}{D} = \frac{42 \times m_B}{\rho_a \times \sqrt{g \times D}} \quad (3.21)$$

onde:

H = altura da chama visível [m];

D = diâmetro da poça [m];

ρ_a = massa específica do ar (1,2 kg/ m^3 a 20 °C e 1 atm) e

g = aceleração da gravidade (9,81 m/s^2).

d) fator geométrico

O fator geométrico da fonte pontual é calculado através da seguinte expressão [16]:

$$F_p = \frac{1}{4 \times \pi \times d_p^2} \quad (3.22)$$

onde:

F_p = fator geométrico da fonte pontual [m^{-2}] e

d_p = distância entre o centro geométrico da chama e o ponto de interesse [m].

e) transmissividade atmosférica

A radiação térmica é absorvida e espalhada pela atmosfera, causando uma redução no nível de radiação recebida no ponto de interesse.

Alguns modelos para cálculo de radiação térmica ignoram este efeito, considerando a transmissividade atmosférica como sendo igual a um. No entanto, para distâncias superiores a 20 metros, onde a absorção pode ser de 20 a 40 %, esta consideração pode superestimar a radiação térmica recebida no ponto de interesse.

A transmissividade atmosférica pode ser estimada através da seguinte expressão [33]:

$$\tau_a = 2.02 \times (p_w \times d_s)^{-0,09} \quad (3.23)$$

onde:

p_w = pressão parcial do vapor d'água [Pa] e

d_s = distância entre a superfície da chama e o ponto de interesse [m].

sendo:

$$p_w = 1013,25 \times u_a \times \exp\left(14,4114 - \frac{5328}{T_a}\right) \quad (3.24)$$

onde:

u_a = umidade relativa do ar [%] e

T_a = temperatura ambiente [K].

f) fluxo térmico

O fluxo térmico recebido no ponto de interesse, a uma determinada distância da fonte pontual, pode ser estimado através da seguinte equação [16, 32, 33, 35]:

$$E_r = \tau_a \times f \times m_B \times \Delta H_C \times A \times F_p \quad (3.25)$$

onde:

E_r = fluxo térmico recebido no ponto de interesse [W/m^2];

f = fração da energia total convertida em radiação térmica (tipicamente entre 0,15 e 0,40) e

A = área total da poça [m^2].

Na Tabela 3.8 são apresentados valores de f para algumas substâncias inflamáveis.

Tabela 3.8 - Fração da energia total convertida em radiação [40, 42].

Substância inflamável	Fração da energia total convertida em radiação (f)
Hidrogênio (H_2)	0,15
Metano (CH_4)	0,20
Etileno (C_2H_4)	0,25
Propano (C_3H_8)	0,30
Butano (C_4H_{10})	0,30
Hidrocarbonetos de cadeias mais longas	0,40

Quando o acidente envolvendo exposição de pessoas à radiação térmica durar mais de 30 segundos sugere-se, neste trabalho, para o cálculo das conseqüências, considerar um tempo de exposição de 30 segundos. Esta sugestão baseia-se no tempo utilizado para determinação do “impacto térmico seguro”.

3.4.6. Jato de fogo (*jet fire*)

O fenômeno de jato de fogo ocorre quando há a combustão de substância inflamável liberada em unidades de processos pressurizadas. A principal consequência deste fenômeno está relacionada, assim como o incêndio em poça, aos efeitos da radiação térmica no local.

O modelo apresentado a seguir, para cálculo da radiação térmica recebida no ponto de interesse, considera, de forma conservativa, que o jato de fogo é vertical e que a fonte é pontual e está localizada no centro da chama. Este modelo se aplica somente a gases inflamáveis em condições atmosféricas calmas, não sendo aplicável a líquidos inflamáveis ou fluxos bifásicos.

O comprimento da chama visível pode ser expresso pela seguinte equação [16, 33, 35]:

$$\frac{L}{D_j} = \frac{5,3}{C_M} \times \sqrt{\frac{T_f}{T_j \times \alpha_M} \times \left[C_M + (1 - C_M) \times \frac{M_a}{M_c} \right]} \quad (3.26)$$

onde:

L = comprimento visível da chama turbulenta medida a partir do ponto de vazamento [m];

D_j = diâmetro do furo por onde está ocorrendo o vazamento [m];

C_M = fração molar do combustível na mistura estequiométrica combustível/ar;

T_f, T_j = temperatura adiabática da chama e temperatura do jato do fluido, respectivamente [K];

α_M = moles de reagente (combustível e ar) por mol do produto (CO_2 , H_2O e N_2) para uma mistura estequiométrica combustível/ar;

M_a = massa molar do ar [kg/mol] e

M_c = massa molar do combustível [kg/mol].

Com relação ao diâmetro do furo por onde ocorrerá o vazamento, não existe um consenso na literatura disponível sobre a definição do valor deste parâmetro. Pode-se encontrar várias sugestões para tubulações, tais como [33]:

- 20% e 100% do diâmetro do tubo;

- dimensões de 5 cm e 10 cm, independentemente do diâmetro do tubo e
- dimensões de 0,5 cm, 2,5 cm, 10 cm e 15 cm e ruptura total para tubos com diâmetro menor que 15 cm.

Para a maioria dos combustíveis C_M é muito menor que 1, α_M é aproximadamente 1 e a razão T_f/T_j varia entre 7 e 9. Aplicando esta simplificação à equação (3.23) obtém-se:

$$\frac{L}{D_j} = \frac{15}{C_M} \times \sqrt{\frac{M_a}{M_c}} \quad (3.27)$$

O fluxo de radiação térmica recebido no ponto de interesse, considerando a fonte de radiação pontual, pode ser expresso por:

$$E_r = \tau_a \times f \times \dot{m} \times \Delta H_C \times F_p \quad (3.28)$$

onde:

E_r = fluxo térmico recebido no ponto de interesse [kW/m²];

τ_a = transmissividade atmosférica;

f = fração da energia total convertida em radiação térmica;

$\dot{m}$ = vazão mássica do combustível através do local de vazamento [kg/s];

ΔH_C = calor de combustão do combustível [kJ/kg] e

F_p = fator geométrico da fonte pontual [m⁻²].

O fator geométrico da fonte pontual (F_p) é calculado através da expressão (3.22).

A vazão mássica do combustível ($\dot{m}$) é calculada através das seguintes expressões [33, 43]:

- para fluxo subsônico

$$\dot{m} = c_d \times A_v \times p_1 \times \sqrt{\frac{k \times G \times M_c}{R_g \times T_1} \times \frac{k}{k-1} \times \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{2/k} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} \right]} \quad (3.29)$$

- para fluxo sônico

$$\dot{m} = c_d \times A_v \times p_1 \times \sqrt{\frac{k \times G \times M_c}{R_g \times T_1} \times \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k+1/k-1}} \quad (3.30)$$

onde:

$\dot{m}$ = vazão mássica do gás através do local de vazamento [kg/s];

c_d = coeficiente de descarga (igual a 1 em uma estimativa conservativa);

A_v = área do local de vazamento [m²];

p_1 = pressão a montante do local de vazamento [Pa];

p_2 = pressão a jusante do ponto de vazamento [Pa];

k = razão do calor específico (C_p/C_v);

G = constante gravitacional (1 kg.m/N.s²);

R_g = constante do gás ideal (0,082057 m³.atm/kmol.K) e

T_1 = temperatura a montante do ponto de vazamento [K].

Para determinação do regime do fluxo, utiliza-se a expressão 3.31. Se atendida, o regime é considerado sônico, caso contrário, subsônico:

$$\frac{p_1}{p_2} \geq \left(\frac{k+1}{2}\right)^{k/(k-1)} \quad (3.31)$$

3.4.7. Incêndio em nuvem de vapor (*flash fire*)

O único modelo encontrado na literatura para cálculo da radiação térmica proveniente de incêndio em nuvem de vapor é o de Raj e Emmons (1975), que considera uma nuvem bidimensional, com chama turbulenta, se propagando a uma velocidade constante. Este modelo é baseado nas seguintes observações experimentais [32]:

- a nuvem é consumida por uma chama turbulenta cuja frente se propaga a uma velocidade que é aproximadamente proporcional à velocidade do ar ambiente;
- quando a nuvem de vapor se incendeia, sempre há uma frente da chama principal que se propaga com velocidade uniforme, seguida por uma zona ardente e
- quando a concentração do gás é alta, a queima é caracterizada pela presença de uma grande chama com difusão turbulenta. Nos pontos onde o vapor da nuvem já se misturou suficientemente com o ar, a profundidade vertical da zona ardente visível é aproximadamente igual à profundidade inicial visível da nuvem.

O modelo acima citado é uma extensão direta do modelo de incêndio em poça, desenvolvido por Steward (1964), e uma simplificação excessiva da realidade. O fato de considerar que a velocidade da chama é proporcional à velocidade do vento implica que, em condições atmosféricas calmas, esta velocidade seria incrivelmente baixa, com um tempo de propagação da chama extraordinariamente alto [32].

A referência [32] apresenta uma lista parcial de tópicos que necessitam ser melhor investigados neste modelo:

- influência da composição da nuvem na emissão de radiação da chama;
- dinâmica do incêndio em nuvens de vapor: dependência da velocidade e altura da chama com a composição da nuvem, velocidade do vento e posição da nuvem e
- um modelo dinâmico que inclua os efeitos não homogêneos da composição da nuvem, da velocidade do vento e da posição da nuvem.

3.4.8. Concentração de material tóxico devida a liberação para a atmosfera

A concentração de material tóxico na atmosfera, em função da distância, d , do ponto de liberação, pode ser calculada através da seguinte expressão [44, 45]:

$$\chi_{(d)} = \frac{\chi}{Q}(d) \times \dot{Q} \quad (3.32)$$

onde:

$\chi_{(d)}$ = concentração de material tóxico na atmosfera na distância d [mg/m³];

$\frac{\lambda}{Q}(d)$ = fator de difusão atmosférica em função da distância [s/m³] e

$\dot{Q}$ = taxa de liberação do material tóxico para a atmosfera [mg/s].

Considerando uma liberação instantânea em uma sala e posterior liberação para a atmosfera, em função de uma taxa de exaustão ou taxa de fuga, e em função do tempo de exposição do indivíduo, a taxa de liberação do material tóxico pode ser calculada através da seguinte expressão [11]:

$$\dot{Q} = \lambda' \times Q_0 \times (1 - e^{-\lambda' t_a}) \quad (3.33)$$

onde:

Q_0 = massa total do material tóxico liberado na sala [mg];

$\lambda' = R_e / V$ [1/s];

R_e = vazão de exaustão ou taxa de fuga [m³/s];

V = volume da sala [m³] e

t_a = tempo de permanência do indivíduo a uma distância d do local do acidente.

No caso de vazamento de líquido tóxico em dique ou no solo, a taxa de liberação do material para a atmosfera, devida à evaporação, pode ser calculada através da seguinte expressão [33]:

$$\dot{Q} = \frac{M_{le} \times c_m \times A \times P_{sat}}{R_g \times T_l} \text{ [kg/s]} \quad (3.34)$$

onde:

M_{le} = massa molar do líquido em evaporação [kg/mol];

c_m = coeficiente de transferência de massa [m/s];

A = área da poça [m²];

P_{sat} = pressão de saturação de vapor do líquido [atm];

R_g = constante do gás ideal (82,057 x 10⁻⁶ m³.atm/mol.K) e

T_l = temperatura do líquido [K],

sendo:

$$c_m = c_m^o \times \left(\frac{M_o}{M_{le}} \right) \quad (3.35)$$

onde:

c_m^o = coeficiente de transferência de massa de referência, usa-se o da água (0,83 cm/s) e

M_o = massa molar da água (18 g/mol).

Este modelo para cálculo de taxa de evaporação é aplicável para líquidos com ponto de ebulição próximo ou acima da temperatura ambiente.

3.4.9. Concentração de material tóxico devida a liberação para interiores de prédios

Apesar dos estudos de difusão atmosférica terem realizados progressos consideráveis em termos de conhecimentos sobre o fenômeno e seu modelamento matemático, o mesmo não ocorreu com relação à dispersão em áreas internas em instalações que manipulam substâncias potencialmente perigosas [46, 47].

Uma equação que pode ser utilizada para estimar as concentrações em áreas internas a prédios, à várias distâncias da sala, d , onde ocorreu o acidente é [11]:

$$C_{(d)} = \frac{Q_o}{A_s \times d_s} \quad (3.36)$$

onde:

$C_{(d)}$ = concentração de material tóxico em áreas internas a prédios em função da distância [mg/m³];

Q_o = massa total do material tóxico liberado na sala [mg],

A_s = área transversal da sala [m²] e

d_s = distância máxima entre a sala onde ocorreu o acidente e o ponto de interesse [m].

As premissas implícitas neste modelo são:

- a taxa de fuga da sala onde ocorreu o acidente é suficiente para espalhar rapidamente o material tóxico até o local onde está sendo calculada a concentração i ,
- o espalhamento do material ocorre preferencialmente na direção da sala onde está sendo calculada a concentração e

- a concentração na sala se mantém constante durante todo o transcorrer do acidente.

3.4.10. Exposição externa de pessoas à radiação ionizante

A exposição externa de pessoas à radiação ionizante se dá quando um indivíduo é exposto a uma fonte de radiação localizada externamente ao seu corpo.

Os efeitos da radiação ionizante nos seres humanos podem ser classificados como determinísticos ou probabilísticos (ANEXO I). Os efeitos probabilísticos em seres humanos estão sujeitos a muitas incertezas em função dos estudos pertinentes terem como limitação um universo reduzido de pessoas expostas à radiação [48]. Por esta razão, o cálculo das conseqüências devidas a acidentes envolvendo material radioativo serão abordados, neste trabalho, considerando somente os efeitos determinísticos.

São apresentados, a seguir, alguns modelos utilizados para estimativa da dose recebida, por pessoas, devido a esta exposição.

3.4.10.1 Dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida à exposição de um indivíduo a uma fonte de radiação, emissora gama

A estimativa da dose equivalente efetiva no corpo inteiro, H_{Ei} , devida à exposição de um indivíduo a uma fonte de radiação pontual, emissora gama (noções básicas sobre cálculo de dose devido à radiação ionizante são apresentadas no ANEXO I), em função da distância, pode ser feita através da seguinte expressão [49]:

$$H_{Ei} = \frac{(Q \times \Gamma_i) \times t_f}{d_f^2} \text{ [Sv]} \quad [3.37]$$

onde:

H_{Ei} = dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida ao radionuclídeo i emissor gama [Sv],

Q = atividade da fonte [Bq],

Γ_i = constante gama do radionuclídeo i [Gy/h.Bq],

t_f = tempo de exposição do indivíduo à fonte de radiação [s] e

d_f = distância entre a fonte e o ponto de interesse [m].

Na Tabela 3.9 é apresentado um resumo dos possíveis efeitos determinísticos, em pessoas, em função da dose equivalente efetiva, H_E , resultantes da exposição aguda de corpo inteiro à radiação ionizante.

Tabela 3.9 - Possíveis efeitos determinísticos, em pessoas, resultantes da exposição aguda de corpo inteiro à radiação ionizante (baseada em [48, 50, 51, 52])

Dose [Sv]	Efeito mais provável
$0 < H_E \leq 0,25$	Nenhum efeito clínico detectável.
$0,25 < H_E \leq 0,5$	Possíveis alterações em células sangüíneas, com posterior recuperação.
$0,5 < H_E \leq 1$	Alterações em células sangüíneas, com nenhuma incapacidade permanente.
$1 < H_E \leq 2$	Possíveis danos graves com incapacitação.
$2 < H_E \leq 4$	Danos e incapacitação graves, possibilidade de mortes.
$4 < H_E \leq 6$	Morte de 50 % das pessoas expostas.
$H_E > 6$	Morte de 100 % das pessoas expostas

3.4.10.2. Dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida a gama e nêutrons prontos em acidente de criticalidade

Entende-se por dose equivalente efetiva no corpo inteiro a dose recebida por uma pessoa exposta a uma fonte de radiação ionizante externa ao corpo humano, emissora de raios X ou gama. A exposição a estas fontes irradia o corpo inteiro e cada órgão recebe, aproximadamente, a mesma dose.

O modelo utilizado para o cálculo de dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida à radiação gama e nêutrons prontos em acidente de criticalidade (ANEXO I), é o apresentado no Regulatory Guide 3.34 [53]:

$$H_{E\gamma} = 2,1 \cdot 10^{-22} \times N \times d_c^{-2} \times e^{-3,4d_c} \quad (3.38)$$

$$H_{En} = 7 \cdot 10^{-22} \times N \times d_c^{-2} \times e^{-5,2d_c} \quad (3.39)$$

onde:

$H_{E\gamma}$ = dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida aos raios gama, em Sv;

H_{En} = dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida aos nêutrons, em Sv;

N = número máximo de fissões esperado para o acidente de criticalidade e

d_c = distância entre o local onde ocorreu a criticalidade e o ponto de interesse, em km.

O número máximo de fissões, N , utilizado para cálculo de dose devido a gama e nêutrons prontos é 10^{19} fissões para acidentes envolvendo soluções e de 10^{18} fissões para acidentes envolvendo sólidos [54].

3.4.10.3 Dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida à radiação externa proveniente da liberação de material radioativo, emissor gama, para a atmosfera

A estimativa da dose equivalente efetiva no corpo inteiro, H_{Ei} , devida à exposição a radionuclídeos emissores gama, em função da distância, pode ser feita através da seguinte expressão [55]:

$$H_{Ei} = 6,76 \times 10^{-14} \times \frac{\chi}{Q}(d) \times \sum_i^n \bar{E}_{\gamma_i} \times Q_i \quad (3.40)$$

onde:

H_{Ei} = dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida ao radionuclídeo i emissor gama [Sv],

$6,76 \times 10^{-14}$ = fator de conversão [Sv.m³.des/Bq.MeV.s],

$\frac{\chi}{Q}(d)$ = fator de difusão atmosférica em função da distância [s/m³],

$\bar{E}_{\gamma_i}$ = energia média dos raios gama do radionuclídeo i [MeV/des] e

Q_i = atividade total do radionuclídeo i liberada para a atmosfera [Bq].

Considerando uma liberação instantânea em uma sala e posterior liberação para a atmosfera, em função de uma taxa de exaustão ou taxa de fuga e em função do tempo de exposição do indivíduo, Q_i , pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$Q_i = Q_{o_i} \times \frac{\lambda'}{\lambda_i + \lambda'} \times (1 - e^{-(\lambda_i + \lambda')t_a}) \quad (3.41)$$

onde:

Q_{o_i} = atividade total do radionuclídeo i liberada na sala [Bq],

$\lambda' = R_e/V$ [1/s],

R_e = vazão de exaustão ou taxa de fuga [m³/s]

V = volume da sala [m³],

λ_i = constante de decaimento do radionuclídeo i [1/s] e

t_a = tempo de permanência do indivíduo a uma distância d do local do acidente [s].

A expressão (3.41) é deduzida através da consideração da redução infinitesimal da concentração do material tóxico dentro da instalação, devida à vazão da exaustão ou taxa de fuga e ao decaimento radioativo, durante todo o transcorrer do acidente [11].

3.4.10.4. Taxa de dose no corpo inteiro devida a liberação de material radioativo em interiores de prédios

A estimativa da taxa de dose equivalente efetiva no corpo inteiro, $\dot{H}_{Ei}$, devida a emissores gama liberados em interiores de prédios pode ser calculada através da seguinte expressão [51]:

$$\dot{H}_{Ei} = 7,08 \times 10^{-13} \times \frac{Q_{o_i}}{V} \times \bar{E}\gamma_i \quad (3.42)$$

onde:

$\dot{H}_{Ei}$ = taxa de dose equivalente efetiva no corpo inteiro [Sv/s];

Q_{o_i} = atividade total do radionuclídeo i liberado na sala [Bq];

V = volume da sala [m³] e

$\overline{E}\gamma_i$ = energia média dos raios gama do radionuclídeo i [Mev/des].

3.4.11. Exposição interna de pessoas à radiação ionizante

A exposição interna de pessoas à radiação ionizante se dá quando uma fonte de radiação é introduzida no corpo humano. A incorporação de fontes de radiação ionizante pelos seres humanos se dá, normalmente, pela inalação ou ingestão de substâncias radioativas.

Em geral, a dose devida à incorporação substâncias radioativas pelos seres humanos não é uniforme, pois os radioisótopos tendem a se concentrar em órgãos específicos. O órgão que recebe a maior dose devido a este processo é chamado de órgão crítico.

São apresentados, a seguir, alguns modelos utilizados para estimativa desta dose.

3.4.11.1 Incorporação, por inalação, de substâncias radioativas liberadas para a atmosfera

A estimativa da incorporação, por inalação, de substâncias radioativas liberadas para a atmosfera pode ser feita através da seguinte expressão [50]:

$$M_I = \frac{\chi}{Q}(d) \times M_R \times B \quad (3.43)$$

onde:

M_I = massa da substância radioativa incorporada por inalação [mg];

$\frac{\chi}{Q}(d)$ = fator de difusão atmosférica em função da distância [s/m³],

M_R = massa da substância radioativa liberada para a atmosfera [mg] e

B = taxa de respiração ($3,47 \times 10^{-4}$ m³/s) [56].

Esta estimativa pode ser feita, também, através da seguinte expressão [50]:

$$M_I = C_R \times t \times B \quad (3.44)$$

sendo,

$$C_R = \frac{\chi}{Q}(d) \times \frac{M_R}{t_I} \quad (3.45)$$

onde:

C_R = concentração da substância radioativa no ar em função da distância [mg/m^3];

t = tempo de duração da exposição de pessoas à nuvem de substância radioativa [s] e

t_l = tempo de duração da liberação de substância radioativa para a atmosfera.

3.4.11.2. Dose equivalente efetiva comprometida, por inalação, no órgão crítico devida a inalação de material radioativo liberado para a atmosfera

A estimativa da dose equivalente efetiva, no órgão crítico, T , devida à inalação do radionuclídeos emissores gama, H_{ETi} , em função da distância, pode ser feita através da seguinte expressão pode ser expressa por [57]:

$$H_{ETi} = B \times \frac{\chi}{Q}(d) \times \sum_i^n DFC_{Ti} \times Q_i \quad (3.46)$$

onde:

H_{ETi} = dose equivalente efetiva comprometida no órgão crítico, T , devida à inalação do radionuclídeo i [Sv],

B = taxa de respiração ($3,47 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$) [56],

DFC_{Ti} = fator de conversão de dose equivalente efetiva comprometida, por inalação, para o órgão T [58, 59] devida ao nuclídeo i , [Sv/Bq] e

Q_i = atividade total do radionuclídeo i liberada para a atmosfera [Bq].

3.4.11.3. Taxa de dose equivalente efetiva comprometida, por inalação, no órgão crítico devida a inalação de material radioativo liberado em interiores de prédios

De uma maneira conservativa, a taxa de dose no órgão crítico, T , devida à inalação, a uma distância d do local do acidente, $\dot{H}_{EBi}$, em áreas internas a prédios pode ser calculada através da seguinte equação:

$$\dot{H}_{EBi} = C_d^i \times DFC_{iT} \times B \quad (3.47)$$

onde:

$\dot{H}_{EBi}$ = taxa de dose devida à inalação do radionuclídeo i [Sv/s] e

C_d^i = concentração do radionuclídeo i a uma distância d [Bq/m³];

sendo:

$$C_{(d)}^i = \frac{Qo_i}{A_s \times d_s} \quad (3.48)$$

onde:

Qo_i = atividade total do radionuclídeo i liberado na sala [Bq],

A_s = área transversal da sala [m²] e

d_s = distância entre a sala onde ocorreu o acidente e o ponto de interesse [m].

3.4.12. Explosão física de vasos contendo gases que se comportam como gás ideal

A referência [32] descreve algumas técnicas para se estimar a sobrepressão devida à ruptura de um vaso contendo gás ideal. Estes métodos são derivados, na maioria, de estudos experimentais de pequena escala realizados por Baker et al. [33].

Um dos métodos, chamado de “**Método Básico**” [32], pode ser aplicado por meio dos seguintes passos:

Passo 1 - Coleta de dados.

Isto inclui:

p_i = pressão interna absoluta do vaso [N/m²];

p_o = pressão atmosférica [N/m²];

V_g = volume do gás no vaso [m³];

k = razão do calor específico do gás [C_p/C_v];

d_v = distância entre o centro do vaso e o ponto de interesse [m] e

forma do vaso = cilíndrico ou esférico.

Passo 2 – Cálculo da energia da expansão, E_{ex} , através da seguinte expressão:

$$E_{ex} = 2 \times \frac{(p_i - p_o) \times V_g}{k - 1} \text{ [J]} \quad (3.49)$$

Passo 3 – Determinação da “distância normalizada para explosão física”, $\bar{d}_{ef}$

Para determinação da “distância normalizada” do vaso ao ponto de interesse utiliza-se a seguinte expressão:

$$\bar{d}_{ef} = d_v \times \left(\frac{p_o}{E_{ex}} \right)^{1/3} \quad (3.50)$$

Passo 4 – Verificação de $\bar{d}_{ef}$

Para $\bar{d}_{ef} < 2$, o “método básico” leva à obtenção de valores muito altos de sobrepressão; nestes casos deve-se usar o “método refinado”, apresentado adiante, para obtenção de estimativas precisas de sobrepressão.

Passo 5 – Determinação da “sobrepressão normalizada”, $\bar{p}_s$

Para determinar a “sobrepressão normalizada”, $\bar{p}_s$, deve-se fazer a leitura na Figura 3.3 ou 3.4 para o $\bar{d}_{ef}$ apropriado. Na Figura 3.3 deve-se fazer a leitura de $\bar{p}_s$ na curva indicada como altamente explosivo.

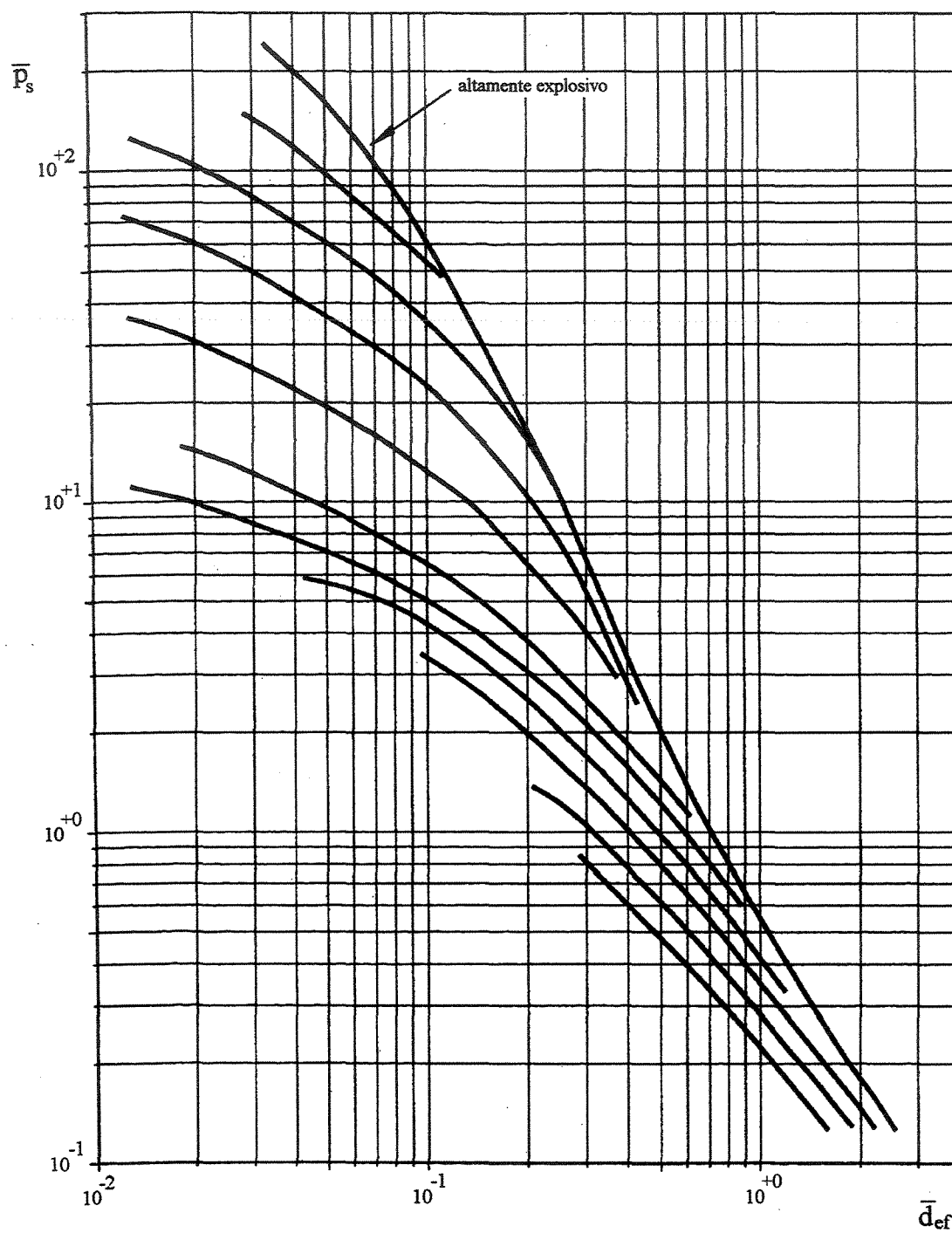


Figura 3.3 - Sobrepressão normalizada ($\bar{p}_s$) versus distância normalizada ($\bar{d}_{ef}$) [60].

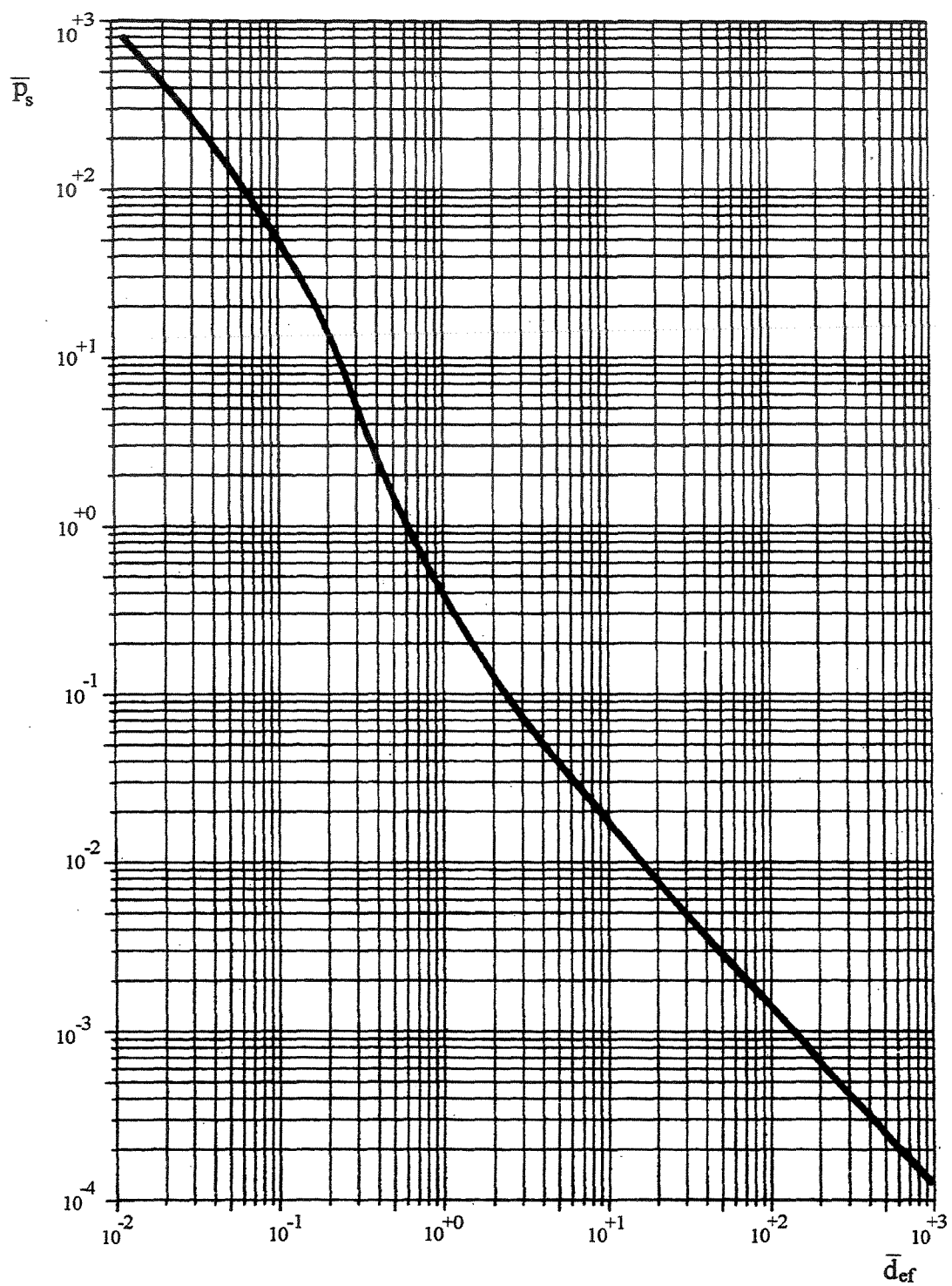


Figura 3.4 - Sobrepressão normalizada ($\bar{p}_s$) versus distância normalizada ($\bar{d}_{ef}$) [60].

Passa 6 – Ajuste de $\bar{p}_s$

Os procedimentos descritos anteriormente fornecem os procedimentos aplicáveis a uma onda de choque totalmente simétrica, como resultado de uma explosão de um vaso hemisférico situado diretamente no solo. Na prática, os vasos são cilíndricos ou esféricos, e localizados a alguma altura do solo. Para ajustar estes aspectos geométricos, $\bar{p}_s$ deve ser multiplicado por um fator de ajuste, derivado de experimentos de cargas altamente explosiva e com várias formas.

As Tabelas 3.10 e 3.11, fornecem os fatores multiplicadores para ajuste dos valores para vasos cilíndricos, para vários $\bar{d}_{ef}$ e para vasos esféricos localizados ligeiramente acima do solo, respectivamente.

Tabela 3.10 - Fatores de ajuste de $\bar{p}_s$ para vasos cilíndricos a vários $\bar{d}_{ef}$ [60].

$\bar{d}_{ef}$	Multiplique $\bar{p}_s$ por
$\bar{d}_{ef} < 0,3$	4
$0,3 \leq \bar{d}_{ef} \leq 3,5$	1,6
$\bar{d}_{ef} > 0,35$	1,4

Tabela 3.11 - Fatores de ajuste de $\bar{p}_s$ para vasos esféricos a vários $\bar{d}_{ef}$ [60].

$\bar{d}_{ef}$	Multiplique $\bar{p}_s$ por
$\bar{d}_{ef} < 1$	2
$\bar{d}_{ef} \geq 1$	1,1

A onda de choque oriunda de vasos cilíndricos é mais fraca no sentido do seu eixo; assim, o campo do impacto é assimétrico para vasos posicionados horizontalmente. Este método fornece apenas os valores máximos para os parâmetros de um tanque horizontal.

Passo 7 – Cálculo do pico de sobrepressão, p_s

Para o cálculo do pico da sobrepressão p_s , a partir da sobrepressão normalizada, $\bar{p}_s$, utiliza-se a seguinte expressão:

$$p_s = (p_{sabs} - p_o) = \bar{p}_s \times p_{om} \text{ [kPa]} \quad (3.51)$$

onde:

p_{sabs} = pico da sobrepressão absoluto [kPa] e

p_{om} = pressão atmosférica ao nível do mar ($\sim 101,3$ kPa)

Passo 8 – Verificação do valor da sobrepressão, p_s

Em regiões próximas ao vaso o “método básico” pode levar a resultados de sobrepressão da onda de choque maiores que a pressão do vaso, o que é fisicamente impossível. Neste caso, o valor da sobrepressão, p_s , deve ser tomado como sendo o valor da pressão do vaso.

“Método Refinado”

Se $\bar{d}_{ef} < 2$ o “método básico”, apresentado anteriormente, deve ter uma outra abordagem. Esta abordagem consiste em substituir os passos 4 e 5 do “método básico” pelos seguintes passos:

Passo 4a – Cálculo do raio inicial do vaso

Para este cálculo considera-se um vaso hemisférico localizado no solo. Obtém-se, neste caso, a seguinte expressão para o raio inicial do vaso.

$$r_o = \left(\frac{3 \times V_v}{2 \times \pi} \right)^{1/3} \quad (3.52)$$

onde:

r_o = raio inicial do vaso [m] e

V_v = volume do vaso [m³].

Passo 4b - Determinação da “distância inicial normalizada”, $\bar{d}_o$

$$\bar{d}_o = r_o \times \left(\frac{p_o}{E} \right)^{1/3} \quad (3.53)$$

Passo 4c – Cálculo do “pico de sobrepressão inicial normalizada”, $\bar{p}_{so}$

Este cálculo é feito através da expressão:

$$\bar{p}_{so} = \frac{p_s}{p_o} \quad (3.54)$$

O valor de p_s pode ser estimado por meio da expressão apresentada abaixo, e sua solução é obtida por tentativa e erro.

$$p_i = p_s \times \left[1 - \frac{3,5 \times (k-1) \times (p_s - 1)}{\sqrt{\left(\frac{k \times T_g}{M_g} \right) \times (1 + 5,9 p_s)}} \right] \quad (3.55)$$

onde:

p_i = pressão interna absoluta do vaso [bar abs];

p_o = pressão atmosférica [bar abs];

k = razão do calor específico do gás [Cp/Cv];

T_g = temperatura absoluta do gás [K] e

M_g = massa molar do gás [kg/kmol].

Passo 4d – Identificação da curva correspondente a $\bar{p}_{so}$ e $\bar{d}_o$

Com os valores de $\bar{p}_{so}$ e $\bar{d}_o$, identifica-se na Figura 3.3 a curva correspondente (pode ser necessário interpolação)

Passo 5 - determinação de $\bar{p}_{so}$

Para determinar a sobrepressão normalizada utiliza-se a curva identificada no *Passo 4d*, utilizando-se o valor de $\bar{d}_{ef}$ calculado no passo 3 do “método básico”. Continua-se no passo 6 do “método básico”.

3.4.13. Explosão física de vasos contendo líquidos e vapores ou gases não ideais

Na abordagem apresentada no item 3.4.12 considerou-se um modelo para cálculo de expansão física de vasos contendo gás ideal. Na realidade a maioria dos vasos pressurizados contém fluidos cujo comportamento não pode ser descrito, nem mesmo de forma aproximada, pela lei dos gases ideais. Além disso, muitos vasos contêm líquidos superaquecidos que podem vaporizar rapidamente, e até mesmo explodir, quando despressurizados.

A equação (3.49) não fornece resultados aceitáveis para cálculo da energia da explosão com gases reais ou líquidos superaquecidos. Nestas situações deve-se utilizar o trabalho realizado no ar, nas vizinhanças dos vasos, pela expansão do fluido.

Em muitos casos pode existir no vaso, ao mesmo tempo, líquido e vapor. Experimentos mostram que a onda de explosão devida a expansão do vapor é quase sempre separada da gerada por líquidos que se vaporizam rapidamente [32]. Para efeito de cálculo da sobrepressão devida à explosão física de vasos contendo líquidos e vapores considera-se, conservativamente, que as ondas geradas por cada fase são unidas.

O método da sobrepressão gerada por explosão física, nestes casos, pode ser aplicado através dos seguintes passos [32]:

Passo 1 - Coleta de dados.

Devem ser coletados os seguintes dados:

p_i = pressão interna absoluta na falha do vaso (um BLEVE típico é causado por um incêndio cujo calor aumenta a pressão do vaso e diminui a resistência de sua parede. O projeto de válvulas de segurança permite que a pressão real alcance 1,21 vezes o valor da pressão de abertura de segurança);

p_o = pressão atmosférica;

V_f = quantidade do fluido [volume ou massa];

d_o = distância do entre o centro do vaso e ponto de interesse [distância]

T_i = temperatura inicial do fluido e

forma do vaso = cilíndrico ou esférico.

Se o fluido em estudo não estiver listado na Tabela 3.12 ou na Figura 3.5, serão necessários dados termodinâmicos do seu estado inicial e final (expandido à pressão ambiente), tais como :

h = entalpia específica;

s = entropia específica;

v = volume específico.

Tabela 3.12 - Trabalho realizado na expansão de amônia, dióxido de carbono, nitrogênio e oxigênio [32].

Fluido	T_i (K)	p_i (10^5 Pa)	Líquido		Vapor	
			e_{ex}/V_f (kJ/kg)	e_{ex}/V_f (MJ/m ³)	e_{ex}/V_f (kJ/kg)	e_{ex}/V_f (MJ/m ³)
NH ₃ , $T_{sl}=361,0$ K	324,8	21,2	82,5	46,2	297,0	4,89
	360,0	48,0	1562,5	74,7	365,0	14,80
	400,0	102,8	278,5	95,7	344,0	47,00
CO ₂ , $T_{sl}=270,8$ K	244,3	14,8	54,4	58,2	98,0	3,77
	255,4	21,1	60,9	62,1	109,0	6,00
	266,5	29,1	68,1	65,6	117,0	9,17
N ₂ , $T_{sl}=112,3$ K	104,0	10,0	13,2	8,78	41,9	1,75
	110,0	14,5	18,2	11,3	47,7	2,98
	120,0	24,8	28,6	15,0	53,5	6,66
O ₂ , $T_{sl}=137,7$ K	120,0	10,1	12,8	12,5	43,9	1,73
	130,0	17,3	18,7	16,8	53,4	3,65
	140,0	27,5	27,2	22,1	60,0	7,00

T_{sl} = temperatura limite de superaquecimento

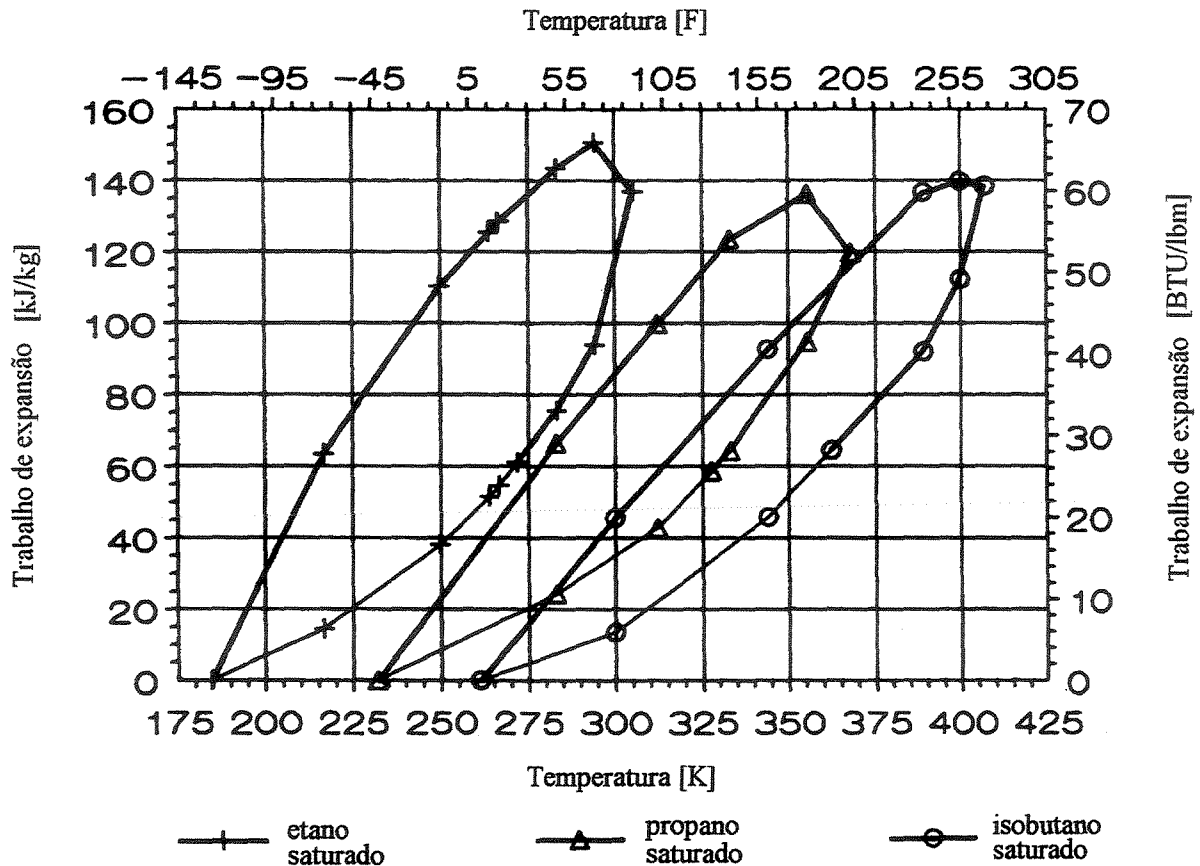


Figura 3.5 - Trabalho de expansão por unidade de massa do etano, propano e isobutano [32].

As Figuras 3.5 e 3.6 apresentam as mesmas informações que constam na Tabela 3.12, para hidrocarbonetos saturados. Na Figura 3.5 o estado de líquido saturado é representado pela parte inferior da curva e o de vapor saturado pela parte superior. Na Figura 3.6 esta representação é inversa, a parte superior da curva representa o estado de líquido saturado e a parte inferior o de vapor saturado.

Os dados termodinâmicos de fluidos podem ser encontrados, entre outras, nas referências [61] e [62].

Passo 2 - Identificação se o fluido é apresentado na Tabela 3.12 ou na Figura 3.5

O trabalho realizado pela expansão do fluido foi calculado para os seguintes fluidos mais comuns: amônia, dióxido de carbono, etano, isobutano, nitrogênio e propano.

Se o fluido de interesse é apresentado na Tabela 3.12 ou na Figura 3.5 deve-se prosseguir no passo 5.

Passo 3 - Determinação da energia interna específica no estado inicial, e_1

O trabalho realizado pela expansão de um fluido é definido como sendo a diferença em energia interna entre o estado inicial e final do fluido. A maioria das tabelas ou gráficos termodinâmicos não apresentam e_1 , apenas h , p , v , T_{abs} (temperatura absoluta) e s . Entretanto, pode-se calcular e através da seguinte equação:

$$h = e + (p_{abs} \times v) \quad (3.56)$$

onde:

h = entalpia específica [J/kg];

e = energia interna específica [J/kg];

p_{abs} = pressão absoluta [N/m²] e

v = volume específico [m³/kg].

Usando um gráfico termodinâmico, localiza-se o estado inicial do fluido (para fluido saturado este ponto está na curva de líquido saturado ou vapor saturado, à pressão p_1) e lê-se a entalpia h_1 , o volume v_1 e a entropia s_1 no gráfico. Se ao invés de um gráfico utilizar-se tabelas termodinâmicas estes parâmetros devem ser identificados por interpolação.

A energia interna específica no estado inicial, e_1 , pode ser calculada através da expressão (3.56).

Como as propriedades termodinâmica de mistura de fluidos não são normalmente conhecidas, pode-se fazer uma estimativa da energia interna de misturas considerando a energia interna de cada componente.

Passo 4 - Determinação da energia interna específica no estado expandido, e_2

A energia interna específica do fluido no estado expandido, e_2 , pode ser determinada da seguinte forma:

- Se for utilizado um gráfico termodinâmico

Considera-se uma expansão isentrópica (entropia, s , é constante) à pressão atmosférica, p_o . Segue-se a linha de entropia constante desde o estado inicial até p_o . Lê-

se h_2 e v_2 neste ponto e calcula-se a energia interna específica, e_2 , através da expressão (3.56).

- Se forem utilizadas tabelas termodinâmicas

Lê-se a entalpia h_f , volume v_f e a entropia s_f do líquido saturado a pressão ambiente, p_o , fazendo as interpolações, se necessário. Da mesma forma lêem-se os valores de h_g , v_g e s_g para o estado de vapor saturado à pressão atmosférica e calcula-se, neste caso, a energia interna específica, e_2 , através da seguinte expressão:

$$e_2 = (1 - X) \times h_f + (X \times h_g) - (1 - X) \times (p_o \times v_f) - (X \times p_o \times v_g) \quad (3.57)$$

onde:

X = razão de vapor $(s_1 - s_f) - (s_g - s_f)$;

s_1 = entropia específica no estado inicial;

s_f = entropia no estado de líquido saturado à pressão atmosférica e

s_g = entropia no estado de vapor saturado à pressão atmosférica.

A equação 3.57 só é válida quando o valor de X estiver entre 0 e 1.

Passo 5 - Cálculo do trabalho específico

O trabalho específico, e_{ex} , realizado pela expansão de um fluido é definido como:

$$e_{ex} = e_1 - e_2 \quad (3.58)$$

O resultado deste cálculo é fornecido, para os sete gases mais comuns, na Tabela 3.12 e nas Figuras 3.5 e 3.6. A temperatura do fluido no momento da explosão deve ser conhecida. Se somente a pressão for conhecida deve-se utilizar tabelas termodinâmicas para encontrar esta temperatura. Da Tabela 3.12 pode-se obter a temperatura limite de super aquecimento, T_{sl} , condições iniciais e o trabalho específico realizado pela expansão com

base na expansão isentrópica do líquido saturado ou vapor saturado até que a pressão atmosférica seja alcançada.

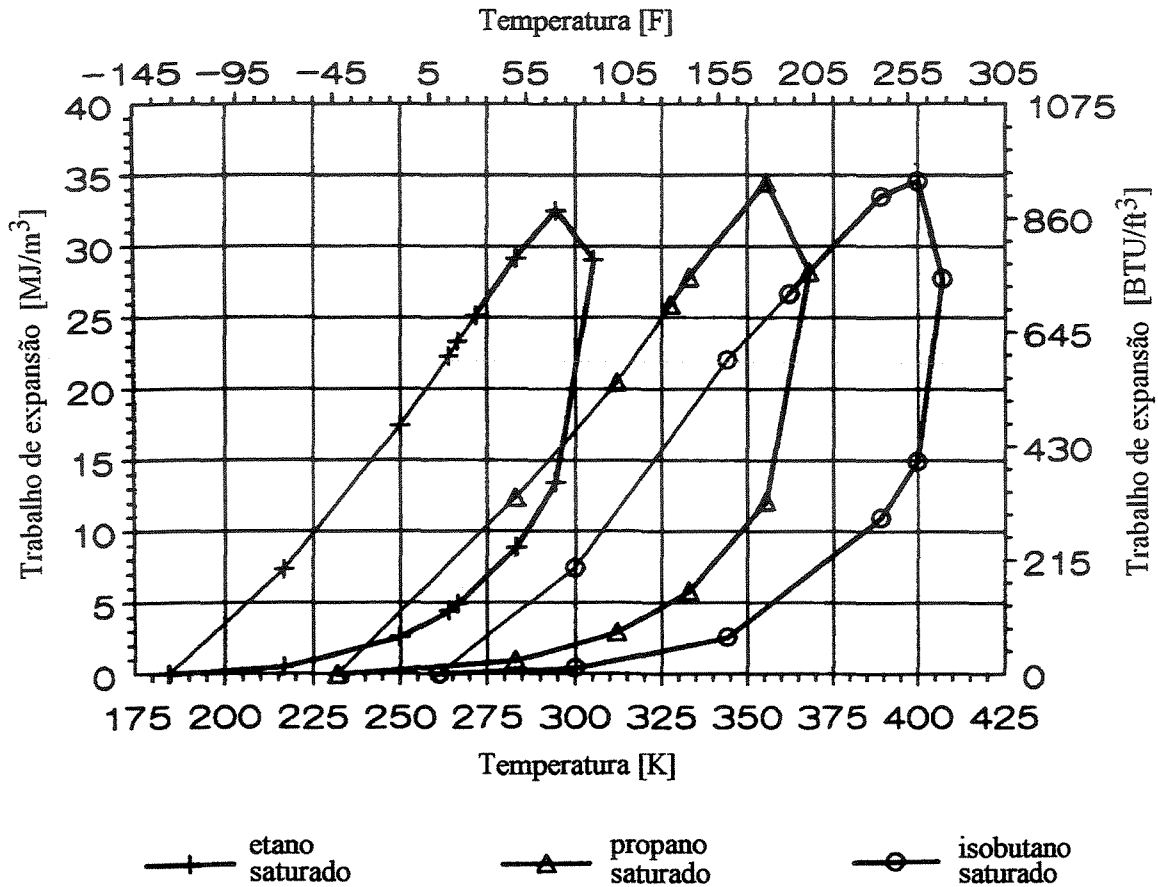


Figura 3.6 - Trabalho de expansão por unidade de volume de etano, propano e isobutano [32].

Passo 6 - Cálculo da energia da expansão, E_{ex}

Para calcular a energia de expansão, E_{ex} , multiplica-se o trabalho de expansão específico, e_{ex} , pela massa do fluido liberada ou, se o trabalho específico estiver por unidade de volume, pelo volume do fluido liberado. Este resultado deve ser multiplicado por 2 para considerar a reflexão da onda de choque no solo, como apresentado na seguinte expressão:

$$E_{ex} = 2 \times e_{ex} \times M_f \quad (3.59)$$

onde:

M_f = massa do fluido liberada [kg]

Passo 7 - Determinação da “distância normalizada”, $\bar{d}$

Para determinação da “distância normalizada” do vaso ao ponto de interesse utiliza-se a seguinte expressão:

$$\bar{d} = d_v \times \left(\frac{p_o}{E_{ex}} \right)^{1/3} \quad (3.60)$$

onde:

d_v = distância do centro do vaso ao ponto de interesse [m].

Continua-se no passo 5 do “método básico” apresentado no 3.4.12. O “método refinado”, também apresentado no item 3.4.12, não pode ser utilizado para gases não ideais porque a expressão (3.55) só se aplica a gases ideais. Entretanto, a sobrepressão pode ser estimada de forma conservativa pela determinação da sobrepressão resultante da detonação de uma carga altamente explosiva e de mesma energia.

3.4.14. Explosão física de vasos em locais distantes de superfícies refletoras

Para explosão física de vasos em locais distantes de superfícies refletoras, os métodos apresentados nos itens 3.4.12 e 3.4.13 podem ser utilizados com pequenas modificações. Como não há, nestes casos, reflexão da onda de choque deve-se substituir no item 3.4.12 a expressão (3.49) pela seguinte expressão [32]:

$$E_{ex} = \frac{(p_i - p_o) \times V}{k - 1} \text{ [J]} \quad (3.61)$$

ou a expressão (3.59) do item 3.4.13, pela seguinte expressão:

$$E_{ex} = e_{ex} \times M_{fl} \quad (3.62)$$

Além das alterações acima, ao se aplicar o “método básico”, não se deve, no passo 6, utilizar os fatores multiplicadores para ajuste dos valores de sobrepressão.

3.5. Técnicas Disponíveis para Identificação de Riscos

A análise de riscos consiste no exame sistemático de uma instalação industrial (na fase de projeto ou de operação) com a finalidade de se identificar os riscos presentes e formar opinião sobre ocorrências potencialmente perigosas e suas possíveis conseqüências. Seu principal objetivo é fornecer elementos que fundamentem um processo decisório de redução de riscos e perdas de uma determinada instalação industrial [63, 64].

Um procedimento para o desenvolvimento de uma análise de riscos pode ser visualizado na Figura 3.7 [5].

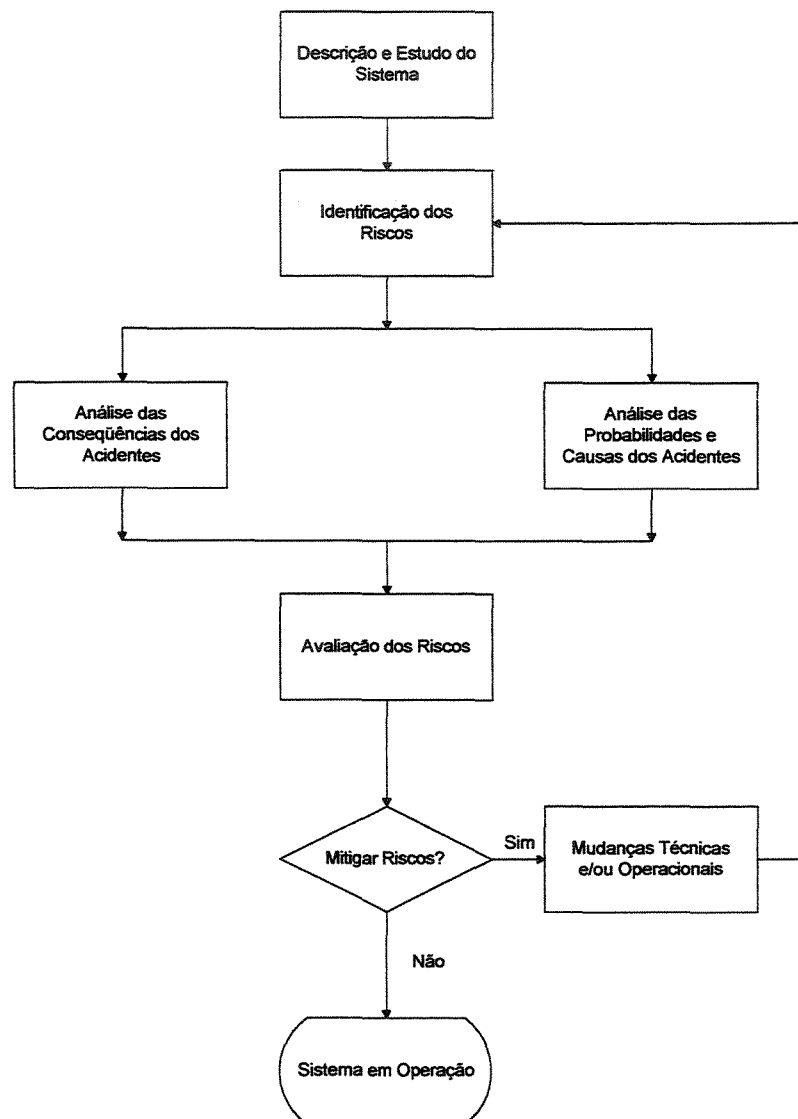


Figura 3.7 - Procedimento para execução de uma análise de riscos (baseado em [5]).

De uma maneira geral, a análise de riscos tem por objetivo responder a uma ou mais das seguintes perguntas relativas a uma determinada instalação industrial [5]:

- 1) Que riscos estão presentes na instalação e o que pode acontecer de errado?
- 2) Qual a probabilidade de ocorrência de acidentes devido aos riscos presentes?
- 3) Quais os efeitos e as conseqüências destes possíveis acidentes?
- 4) Como poderiam ser eliminados ou reduzidos estes riscos?

Para responder à primeira pergunta, diversas técnicas qualitativas e quantitativas são utilizadas para a identificação dos eventos indesejáveis. Para a segunda pergunta, as taxas de falhas de equipamentos e erros humanos (uma das dificuldades desta abordagem é que poucos são os dados disponíveis sobre as probabilidades de falhas humanas), determinadas por técnicas de Engenharia de Confiabilidade com base em banco de dados de falhas e acidentes, são combinadas com o uso da teoria das probabilidades para fornecerem a frequência global de ocorrência do evento indesejável. A terceira pergunta pode ser respondida pelo uso de modelos matemáticos de estimativa de conseqüências de acidentes enquanto que técnicas de controle de riscos cobrem a última questão.

Portanto, analisar um risco é identificar, discutir e avaliar as possibilidades de ocorrência de acidentes, na tentativa de se evitar que estes eventos aconteçam e, caso ocorram, identificar as alternativas que tornam mínimos os danos subseqüentes a estes acontecimentos.

Alguns dos objetivos da execução de análise de riscos em instalações industriais são prevenir, prever falhas e acidentes, minimizar conseqüências e auxiliar na elaboração de planos de emergência. Para isso é necessária a adoção de metodologias sistemáticas e estruturadas para identificação e avaliação de riscos.

As técnicas de análise de riscos permitem abranger todas as possíveis causas de acidentes com danos à propriedade, ao ambiente, financeiros e ao trabalhador. Algumas das principais técnicas utilizadas na análise de riscos são ainda pouco difundidas. A seguir, são apresentadas breves descrições de algumas das técnicas de análise de riscos mais utilizadas atualmente [5].

- **Série de Riscos (SR)**

Série de Riscos é uma técnica qualitativa básica da análise de riscos, que permite a determinação da seqüência de riscos associados a um evento catastrófico, que é considerado o risco principal. A partir dos riscos iniciais ou básicos, são seqüenciados todos os riscos subseqüentes capazes de contribuir na série, resultando no risco principal [5].

- **Análise Preliminar de Perigos (APP)**

A Análise Preliminar de Perigos, também conhecida como Análise Preliminar de Riscos (APR) - *Preliminary Hazard Analysis (PHA)*, é uma técnica de avaliação qualitativa. Normalmente é a primeira técnica aplicada durante a análise de riscos de sistemas em fase de concepção ou projeto, principalmente quando do uso de novas tecnologias ou processos que carecem de maiores informações sobre seus riscos. Através desta técnica, uma análise superficial dos riscos é realizada ainda na fase de projeto do processo, de modo que as mudanças necessárias, devido aos riscos identificados, não implicam em gastos expressivos, sendo mais fácil a sua execução [5, 6].

- **What-if (WI)**

What-if é uma técnica de avaliação qualitativa que examina ordenadamente as respostas do sistema frente a falhas de equipamentos, erros humanos e condições anormais do processo. Para aplicação desta técnica, é necessária a constituição de uma equipe com conhecimentos básicos sobre o processo analisado e sobre sua operação. Esta equipe deverá responder a questões do tipo "O que... se... ?" (por exemplo, "O que ocorreria se a válvula de alívio não abrisse na pressão especificada?") na tentativa de identificar os riscos potenciais presentes. Este tipo de análise pode ser aplicado a qualquer processo industrial em qualquer estágio de seu projeto ou desenvolvimento. No entanto, por não ser tão sistemática quanto outras técnicas de análise de riscos, e por seus resultados serem extremamente dependentes da experiência e do conhecimento do grupo de análise, a técnica WI é normalmente utilizada como complemento ou parte auxiliar de outras técnicas como *Checklist*, *HazOp* e *AMFE* [5, 6].

- **Lista de Verificação (*Checklist*)**

O *Checklist*, técnica de avaliação qualitativa, é comumente utilizado para identificar os riscos associados a um processo e para assegurar a concordância entre as atividades desenvolvidas e procedimentos operacionais padronizados. Através desta técnica, diversos aspectos do sistema são analisados por comparação com uma lista de itens preestabelecidos, criada com base em processos similares, na tentativa de descobrir e documentar as possíveis deficiências do sistema. Normalmente, o *Checklist* é utilizado para embasar ou fortalecer os resultados obtidos por outras técnicas de análise de riscos. São comuns *checklists* de partes de equipamentos ou processos operacionais de unidades industriais e de procedimentos de segurança padronizados [5, 6].

- **“*What-if/Checklist*” (WIC)**

Como o nome indica, esta técnica de avaliação qualitativa une as características das técnicas *What-if* e *Checklist*, combinando o *brainstorming* gerado pela primeira com a característica sistemática apresentada pela segunda, resultando, desta forma, em uma análise mais detalhada e completa do sistema [5, 6].

- **Técnica de Incidentes Críticos (TIC)**

A Técnica de Incidentes Críticos é um procedimento qualitativo relativamente novo dentro da análise de riscos, originada no Programa de Psicologia de Avaliação da Força Aérea dos Estados Unidos. Esta técnica busca identificar os riscos de um sistema através da análise do histórico de incidentes críticos ocorridos, os quais são levantados por intermédio de entrevistas com as pessoas que possuem uma boa experiência sobre o processo em análise [5, 6].

- **Análise de Modos de Falha e Efeitos (AMFE) – *Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)***

A Análise de Modos de Falha e Efeitos envolve um estudo detalhado e sistemático das falhas de componentes ou sistemas. Nesta análise, que pode ser tanto qualitativa quanto quantitativa, os modos de falhas de cada componente do sistema são identificados, e os efeitos destas falhas no sistema são avaliados. São, então, propostas medidas de eliminação, mitigação ou controle das causas e

consequências destas falhas. Como este tipo de análise se preocupa essencialmente com componentes mecânicos de um sistema, problemas relacionados a processos químicos, os quais envolvem substâncias químicas reativas, podem ser negligenciados e, portanto, não devem ser analisados apenas pela AMFE [5, 6].

• **Análise de Árvore de Falhas (AAF) – *Fault Tree Analysis (FTA)***

A Análise de Árvore de Falhas é uma técnica que pode ser aplicada para obtenção de resultados tanto qualitativos quanto quantitativos. É uma metodologia de raciocínio dedutivo que parte de um evento, uma falha específica de um sistema, *denominado evento topo*, e busca determinar as relações lógicas de falhas de componentes e erros humanos que possam gerar este evento. A análise é realizada por meio de construção de uma árvore lógica, partindo do evento topo para as falhas básicas. Esta técnica é muito utilizada para quantificar a frequência ou a probabilidade de falha de um sistema, ou seja, é bastante útil na determinação da sua confiabilidade. A Análise de Árvore de Falha é utilizada intensamente nas avaliações probabilísticas de risco de centrais nucleares [5, 6].

• **Análise de Árvore de Eventos (AAE) – *Event Tree Analysis (ETA)***

Nesta análise, que pode ser tanto qualitativa quanto quantitativa, parte-se de um evento básico, resultante de uma falha específica de um equipamento ou erro humano, denominado *evento iniciador*, para determinar um ou mais estados subsequentes de falha possíveis. Deste forma, a AAE considera a ação a ser tomada pelo operador ou a resposta do processo para o evento iniciador. A exemplo da técnica AAF, aqui também é desenvolvida uma árvore, partindo-se do evento iniciador, com a finalidade de quantificar as probabilidades de falha do sistema e identificar as seqüências de acidentes. Assim como a AAF a Análise de Árvore de Eventos também é utilizada intensamente nas avaliações probabilísticas de risco de centrais nucleares [5].

- **Estudo de Operabilidade e Riscos – *Hazard and Operability Studie (HazOp)***

O Estudo de Operabilidade e Riscos, técnica de avaliação qualitativa, foi desenvolvido para um exame eficiente e detalhado das variáveis de um processo, possuindo uma forte semelhança com a técnica AMFE. Através do HazOp, sistematicamente se identificam os caminhos pelos quais os equipamentos do processo podem falhar ou serem inadequadamente operados. A técnica deve ser implantada por uma equipe multidisciplinar. É guiada pela aplicação de palavras específicas - *palavras-guia* - a cada variável do processo, gerando os desvios dos padrões operacionais, os quais são analisados em relação às suas causas e conseqüências. Por ser completa, sistemática e relativamente fácil de ser aplicada, o HazOp é uma das técnicas de análise de riscos mais populares [5].

Outras técnicas de análise menos utilizadas, mas que possuem grande importância em casos de estudos de riscos, são apresentadas a seguir.

- ***Management Oversight and Risk Tree (MORT)***

Esta técnica possui os mesmos fundamentos da AAF. Baseia-se no desenvolvimento de uma árvore lógica, porém aplicada à estrutura organizacional e gerencial de uma empresa [5].

- **Técnica para Predição do Erro Humano – *Technique for Human Error Predicting (THERP)***

A Técnica para Predição do Erro Humano busca identificar as atividades humanas que possam gerar riscos dentro de um sistema, bem como estimar e analisar as falhas provenientes destes erros. Uma avaliação dos fatores que influenciam a performance de operadores, técnicos e outros trabalhadores de instalações industriais também é objetivo desta técnica. Geralmente é utilizada como auxiliar à AAF para a estimativa de taxas de falhas relativas a erros humanos [5, 8].

- **Análise por Simulação de Números Aleatórios – *Random Number Simulation Analysis (RNSA)***

Esta técnica, desenvolvida em 1974, utiliza a AAF como fundamento. Porém, ao invés de atribuir um valor probabilístico para o evento, trabalha com um intervalo de probabilidades no qual a falha possa ocorrer [5].

- **Índices de Risco Dow e Mond – *Relative Ranking - Dow and Mond Indices***

Os Índices de Riscos Dow e Mond fornecem um meio fácil e direto para estimativa dos riscos em uma instalação industrial. Este método baseia-se na atribuição de penalidades e créditos a determinados aspectos da instalação. Assim, aos materiais ou às condições do processo que podem contribuir para um acidente são atribuídas penalidades, enquanto que aos aspectos relativos à segurança da instalação, que podem mitigar os efeitos de um acidente, são atribuídos créditos. Desta forma, as penalidades e os créditos são combinados resultando em um índice relativo ao grau de risco da instalação analisada [5].

- **Revisão de Segurança – *Safety Review***

Este é um método de revisão de uma instalação industrial *in loco*, ou seja, um grupo de especialistas no processo percorre a instalação buscando identificar procedimentos operacionais errôneos ou condições de risco que possam levar a um acidente. Esta técnica é bastante utilizada na área nuclear para avaliação de Relatórios de Análise de Segurança [5].

Além das técnicas de análise de riscos apresentadas existem diversos instrumentos de apoio à aplicação das técnicas, cobrindo principalmente os seguintes itens:

- Banco de dados de confiabilidade de equipamentos e sistemas.
- Banco de dados sobre materiais e corrosão.
- Banco de dados de taxas falhas de sistemas, equipamentos, componentes e de acidentes na indústria.
- *Softwares* para simulação e cálculo da magnitude das conseqüências de eventos catastróficos, como incêndios, explosões, dispersão de gases tóxicos

- *Softwares* para avaliação da probabilidade de ocorrência de eventos indesejáveis.
- *Softwares* que implementam, automatizam e facilitam a utilização das técnicas descritas.

Apesar de cada técnica de análise reunir características, em sua maioria, distintas, a escolha daquela que será utilizada em um procedimento de análise de riscos pode ser difícil. A opção normalmente é a escolha de várias técnicas de análise, as quais se complementam, para analisar diferentes partes do processo, diferentes tipos de riscos associados ao sistema ou diferentes níveis de profundidades [65]. Esta escolha se baseia em questões como os objetivos da análise, a gravidade dos riscos, a complexidade do processo, a natureza dos sistemas envolvidos, as condições do processo, as informações e os dados necessários ou disponíveis, o custo e o tempo necessário para a análise e, também, os pontos favoráveis de cada metodologia de análise.

O desenvolvimento de uma análise de riscos qualitativa apresenta uma relativa facilidade de execução e não necessita de uma utilização muito intensa de recursos adicionais como, banco de dados, *softwares* e cálculos matemáticos. As técnicas quantitativas complementam e aprofundam a análise qualitativa. Muitas vezes, uma técnica de análise detalhada e bem estruturada, como HazOp ou AMFE, deve ser usada como técnica básica para o desenvolvimento de uma análise de riscos de um processo. Em subsistemas menos complexos de um processo, ou onde os riscos sejam menores, pode-se utilizar uso de técnicas como WIC. Em subsistemas mais complexos e com riscos mais severos deve-se desenvolver uma análise mais detalhada e, portanto, técnicas como AAF podem ser utilizadas. Deve-se selecionar as técnicas que melhor se adaptem às exigências da análise, utilizando uma técnica como base e complementando suas deficiências com outras técnicas de análise, de tal forma que seja realizado um estudo eficiente, mas que não se trabalhe demasiadamente ou desnecessariamente um problema, desbalanceando a análise.

A seguir serão analisadas, com mais detalhes, as seguintes técnicas de uso mais freqüente: Estudo de Operabilidade e Riscos (*HazOp*), Análise de Árvore de Falhas (AAF), Análise de Modos de Falha e Efeitos (AMFE), *What-If/Checklist* (WIC), Análise Preliminar de Perigos (APP) e Análise de Árvore de Eventos (AAE).

3.5.1. Estudo de Operabilidade e Riscos - *Hazard and Operability Studies* (HazOp)

O estudo de operabilidade e riscos (HazOp) é uma metodologia de Análise de Riscos que foi desenvolvida para identificar riscos e problemas operacionais em plantas de processos industriais, os quais, apesar de aparentemente não apresentarem riscos imediatos, podem comprometer a produtividade e a segurança da planta. Apesar de ter sido desenvolvida originalmente para análise qualitativa de riscos e problemas operacionais, principalmente na utilização de novas tecnologias, para as quais o conhecimento sobre sua operacionalidade é escasso ou inexistente, esta técnica tem sido efetivamente utilizada em qualquer estágio da vida útil de plantas industriais [5].

O HazOp orienta a realização de um estudo eficiente, detalhado e completo sobre as variáveis envolvidas no processo. Através da sua utilização é possível identificar sistematicamente os caminhos pelos quais os equipamentos que constituem o processo industrial podem falhar ou serem inadequadamente operados, o que levaria a situações de operação indesejadas.

Descrição Geral da Técnica

O HazOp é uma técnica estruturada que foi desenvolvida para identificar riscos de uma instalação industrial, mas que procura, principalmente, identificar problemas referentes aos procedimentos operacionais que possam levar a danos materiais ou humanos. Desta forma, o HazOp não é uma determinação de falhas por excelência, mas uma avaliação não quantificada dos riscos e dos problemas operacionais presentes em um processo industrial.

O HazOp baseia-se na revisão da planta através de uma série de reuniões, durante as quais um grupo composto de diversos especialistas realiza um *brainstorming* sobre o projeto da planta, em busca de riscos, seguindo uma estrutura preestabelecida. Uma das grandes vantagens deste *brainstorming* é que ele estimula a criatividade e gera idéias, através da interação do grupo com os diversos *backgrounds* de seus integrantes. Desta forma, esta técnica oferece aos integrantes da equipe a oportunidade de liberarem sua imaginação, pensando em todos os modos pelos quais um evento indesejado possa ocorrer ou um problema operacional possa surgir.

No entanto, para minimizar a possibilidade de que algo seja omitido, a reflexão é executada de maneira sistemática: cada circuito é analisado, linha por linha, para cada tipo de desvio passível de ocorrer nos parâmetros de funcionamento do processo. Para os objetivos de um HazOp, uma linha é uma conexão por tubulação (ou qualquer outro meio) entre dois equipamentos principais. A equipe de estudo usa desenhos da instalação, parâmetros de processo e palavras-guia no estudo de uma dada instalação, que aplicados a pontos específicos (nós-de-estudo) dos fluxogramas do processo, usualmente em linhas de transporte de fluidos entre dois equipamentos, têm como objetivo evidenciar riscos potenciais nesses pontos.

A aplicação mais eficaz do HazOp ocorre quando o estudo é desenvolvido com base no projeto básico da planta, pois a partir deste ponto o sistema está suficientemente definido para permitir respostas significativas às questões emergentes do procedimento do HazOp. Além do mais, neste ponto, qualquer alteração que necessite ser realizada, em função dos riscos identificados, pode ser feita com um custo relativamente baixo.

O sucesso ou o fracasso da utilização da técnica HazOp depende de fatores como: a integridade e a precisão dos dados utilizados como base para desenvolvimento do estudo, a experiência técnica e o grau de especificidade do estudo alcançado pelo grupo. Depende também da habilidade da equipe em utilizar a técnica como um meio auxiliar para promover o *brainstorming*, visualizando desvios, causas e conseqüências dos riscos identificados, e da capacidade do grupo em concentrar-se nas situações que possam provocar maiores danos ao sistema.

É um método de grande importância para estudos de identificação de riscos e prevenção de problemas operacionais em um processo industrial. A principal utilização da técnica apresentada é para processos contínuos, porém, com pequenas modificações, pode ser aplicada a processos descontínuos.

Conceitos Fundamentais

O processo de execução de um estudo de HazOp é estruturado e sistemático. Faz-se, portanto, necessário o entendimento de alguns termos específicos que são utilizados no desenvolvimento de uma análise de riscos desta natureza [5]:

- *Nós-de-estudo*: são os pontos do processo, localizados através dos fluxogramas da planta, que serão analisados nos casos em que ocorrem desvios.

- *Intenção de operação*: define os parâmetros de funcionamento normal da planta, na ausência de desvios, nos nós-de-estudo.
- *Desvios*: são afastamentos das intenções de operação, que são evidenciados pela aplicação sistemática das palavras-guia aos nós-de-estudo (por exemplo, mais pressão), ou seja, são distúrbios provocados no equilíbrio do sistema.
- *Causas*: são os motivos pelos quais os desvios ocorrem. A partir do momento que se descobre que um desvio possui uma causa possível, ele pode ser tratado como uma ocorrência significativa e analisado adequadamente. As causas dos desvios podem ser falhas do sistema, erros humanos, estados não previstos da operação do processo (por exemplo, mudança de composição de um gás) e distúrbios externos (por exemplo, perda de potência devido à queda de energia elétrica).
- *Conseqüências*: são os resultados decorrentes de um desvio da intenção de operação em um determinado nó-de-estudo (por exemplo, liberação de material tóxico para o ambiente de trabalho).
- *Parâmetros de processo*: são os fatores ou componentes da intenção de operação, ou seja, são as variáveis físicas do processo (por exemplo, vazão, pressão e temperatura) e os procedimentos operacionais (por exemplo, operação e transferência).
- *Palavras-guia ou Palavras-chave*: são palavras simples utilizadas para qualificar os desvios da intenção de operação e para guiar e estimular o grupo de estudo ao *brainstorming*.

Diversos tipos de palavras-guia são utilizados, dependendo da aplicação da técnica. Na Tabela 3.13 apresentam-se as palavras-guia mais utilizadas para o desenvolvimento de um HazOp acompanhadas de seus significados.

Tabela 3.13 - Palavras-guia e seus significados [5].

Palavras-Guia	Significados
Não / Nenhum	Negação da intenção projetada.
Mais (mais alto)	Acréscimo quantitativo.
Menos (mais baixo)	Decréscimo quantitativo.
Parte de	Decréscimo qualitativo.
Além de	Acréscimo qualitativo.
Reverso / Ao contrário de	Oposto lógico da intenção.
Outro que não	Substituição completa.

Estas palavras-guia, quando combinadas com os parâmetros de processo, formam os desvios da intenção de operação da planta. As palavras-guia podem ser aplicadas, tanto a parâmetros de processo mais gerais (por exemplo, reagir, transferir), como a parâmetros mais específicos (por exemplo, pressão, temperatura).

Quando combinadas com os parâmetros gerais, os desvios são usualmente gerados diretamente pela aplicação da palavra-guia. Em alguns casos, quando da aplicação de uma palavra-guia a um parâmetro, pode-se obter mais de um desvio ou mais de um significado para o mesmo desvio. Por exemplo, quando gerado um desvio como "mais reação", através da combinação da palavra-guia "mais" com o parâmetro "reação", isto pode significar que a reação está ocorrendo a uma velocidade maior ou que uma maior quantidade de reagentes está reagindo, sendo que ambas resultam em maior quantidade de produto. Quando combinadas com os parâmetros específicos, podem ser necessárias algumas modificações das palavras-guia.

Em determinadas situações, alguns desvios potenciais são eliminados devido a limitações físicas dos parâmetros de processo em análise. Por exemplo, se a intenção de operação de um nó-de-estudo com relação à temperatura ou à pressão está sendo analisada, as combinações destes parâmetros com as palavras-guia "mais" ou "menos" podem ser as únicas possibilidades de análise. Deste modo, cabe ao grupo que estiver desenvolvendo o estudo de HazOp estabelecer quais as combinações que são significativas e quais não produzem efeitos no sistema.

Alguns exemplos de desvios da intenção de operação, gerados pela combinação das palavras-guia com os parâmetros de processo, são apresentados na Tabela 3.14 [5].

Tabela 3.14 - Exemplos de desvios utilizados no desenvolvimento de um HazOp [5].

Palavra-Guia	&	Parâmetro	Desvios
Nenhum	&	Fluxo	Ausência de fluxo.
Mais	&	Pressão	Pressão mais alta.
Menos	&	Temperatura	Temperatura mais baixa.
Além de	&	Uma fase	Duas ou mais fases.
Outro que não	&	Operação	Manutenção, partida, parada, pico de funcionamento, etc.
Além de	&	Componente	Componentes a mais em relação aos que deveriam existir.
Reverso	&	Fluxo	Fluxo de componente no sentido inverso.
Parte de	&	Componente	Componentes a menos em relação aos que deveriam existir.

Existem algumas modificações das palavras-guia que facilitam o seu uso em determinados casos, como por exemplo:

"antes" ou "depois" em lugar de "outro que não", ao considerar tempo;

"onde mais" em lugar de "outro que não", ao considerar posição, fonte ou destino;

"mais alta" ou "mais baixa" em vez de "mais" ou "menos", ao considerar temperatura ou pressão.

No caso de procedimentos operacionais que envolvam um conjunto complexo de parâmetros de processo inter-relacionados, tais como taxa de reação, composição, temperatura e pressão, é recomendado o uso da seqüência de palavras-guia a cada parâmetro isoladamente, ao invés de aplicar a seqüência a todos os parâmetros em conjunto.

Quando os procedimentos operacionais forem formados por sentenças, a sequência de palavras-guia produz melhores resultados quando aplicada a cada palavra ou frase separadamente, iniciando com a parte chave da frase que descreve a atividade (usualmente verbos e advérbios). Estes componentes da frase normalmente estão relacionados a algum impacto na intenção de operação do processo. Por exemplo, na sentença "O operador inicializa o fluxo A através da abertura da válvula X quando atingida a pressão B", as palavras-guia poderiam ser aplicadas para: "fluxo A" (nenhum, mais, menos, etc.) e "quando atingida a pressão B" (antes, depois, etc.).

Desenvolvimento de um HazOp

Para realizar um HazOp de um projeto ou de uma planta industrial, é necessária a organização e o planejamento prévio das atividades a serem desenvolvidas.

Com este objetivo, pode-se dividir o desenvolvimento de um estudo de HazOp em cinco etapas:

- Definição do escopo do estudo;
- Seleção do grupo de estudo;
- Preparo do material necessário ao estudo;
- Execução do estudo e
- Registro dos resultados.

Estes passos podem ser desenvolvidos ao mesmo tempo, pois a técnica HazOp é desenvolvida de forma recursiva.

- Definição do escopo do estudo

A definição do escopo, ou objetivos, do HazOp deve ser a mais clara possível, de modo a definir o campo de atuação da equipe responsável. Normalmente, os objetivos do estudo são estipulados pelo responsável pela instalação ou projeto, com o apoio do líder do grupo responsável pelo desenvolvimento do estudo.

Mesmo que o objetivo mais geral seja a identificação de riscos e problemas operacionais, faz-se necessária a definição de quais pontos devem ser abordados pelo grupo de estudo, ou seja, a razão pela qual se está desenvolvendo uma análise desta natureza. Dentre as diversas razões para a realização de um HazOp podem ser citadas as seguintes:

- verificar os itens de segurança de um projeto;
- melhorar a segurança de uma planta existente;

- verificar a segurança dos procedimentos de operação de um processo;
- verificar o funcionamento da instrumentação de segurança;
- decidir sobre o local onde pode ser construída uma unidade industrial;
- desenvolver uma lista de questões (*Checklist*) a serem apresentadas ao fornecedor de uma determinada tecnologia.

Além dos objetivos do estudo se faz também necessário a determinação de quais fatores, ou pessoas, serão afetados pelo desenvolvimento do mesmo, assim como:

- a segurança dos empregados (na planta em estudo ou nos arredores da mesma);
- os danos aos equipamentos ou à planta;
- a perda de produção;
- a segurança da população em geral;
- os impactos ambientais.

Por exemplo, um HazOp pode ser conduzido para determinar o local onde deve ser construída uma planta de forma que se obtenha o mínimo impacto na segurança da população. Neste caso específico, o grupo responsável pelo estudo deve dar maior ênfase aos desvios que resultam em riscos externos (população afetada).

- Seleção do grupo de estudo

O uso das palavras-guia sobre o processo em análise não evidencia os problemas através de uma fórmula mágica. Para que esses riscos possam ser evidenciados, um estudo de HazOp normalmente usa uma equipe multidisciplinar de analistas que trabalham em conjunto na identificação de riscos e problemas operacionais através de uma análise sistêmica do processo. Esta equipe deve ser formada por pessoas que possuam experiência e conhecimento suficientes que as permitam pensar e discutir sobre os problemas levantados no decorrer do estudo.

De um modo geral, o coordenador da equipe deve ter experiência em estudos de HazOp para que possa conduzir e orientar a equipe no decorrer da análise. Os outros membros da equipe devem possuir conhecimentos nas outras áreas relacionadas com as instalações do processo em estudo, como mecânica, química, instrumentação, elétrica, segurança e proteção ao meio ambiente.

A equipe de desenvolvimento do HazOp deve ser constituída de, no máximo, sete a oito pessoas de áreas de conhecimentos diferentes. Um grupo maior torna o andamento do

trabalho excessivamente lento. Caso se opte pela formação de um grupo menor, as pessoas que o constituírem devem possuir conhecimento suficiente para cobrir as áreas correspondentes do projeto ou das operações da planta, para garantir a integridade do trabalho.

- Preparo do material necessário ao estudo

A variedade e a quantidade de material necessária ao estudo e o preparo deste, dependem da complexidade e do tamanho da planta ou do projeto em análise. Esta etapa de preparação do material necessário ao estudo baseia-se em quatro fases principais: obtenção dos dados necessários, conversão dos dados para uma forma adequada ao estudo, planejamento da seqüência de estudo e planejamento das reuniões necessárias.

Os dados necessários ao desenvolvimento do estudo consistem tipicamente de vários fluxogramas do processo, leiautes da planta, especificações de equipamentos, diagramas de sistemas de controle, procedimentos operacionais, parâmetros de operação, programas de produção, etc. Estes dados devem ser previamente analisados em busca de discrepâncias ou falhas na informação sobre o processo a ser analisado, e para verificar se realmente são relevantes ao estudo.

- Execução do estudo

Para execução do estudo, a técnica de HazOp requer, primeiramente, a divisão do esquema da planta em nós-de-estudo e, posteriormente, a análise do processo, nestes pontos, com o uso das palavras-guia.

A metodologia consiste em aplicar todas as palavras-guia a cada parâmetro de processo do nó-de-estudo escolhido, gerando desvios da intenção de operação. Estes desvios devem ser analisados em suas causas e conseqüências, e medidas devem ser sugeridas para eliminação ou mitigação das mesmas. Após terem sido respondidas todas as questões resultantes dos desvios gerados, a equipe move-se para o próximo nó-de-estudo e torna a aplicar as palavras-guia aos parâmetros de processo, e assim por diante.

Em processos contínuos, a equipe de estudo analisa o processo progressivamente no sentido do fluxo, aplicando as palavras-guia aos nós-de-estudo, os quais são estabelecidos pelo líder da equipe antes da reunião.

Quando um risco é identificado devido à presença de um desvio no processo, o líder da equipe deve garantir que todos os membros do grupo compreendam as causas e as consequências deste risco, devendo haver um consenso sobre quais medidas devem ser adotadas para minimizar ou eliminar seus efeitos. Neste ponto, posições extremas devem ser evitadas pelo grupo, como por exemplo:

- uma ação é imediatamente sugerida para o risco identificado, sem observar os riscos subseqüentes, identificados ou não;
- nenhuma ação é sugerida antes que todos os riscos do processo tenham sido detectados.

Na realidade deve haver um meio termo entre estas duas situações. Muitas vezes não é possível chegar a uma conclusão sobre quais ações devem ser tomadas, com respeito a determinado risco, durante uma única sessão. Por outro lado, se a solução for clara, o projeto ou as instruções de operação podem ser imediatamente modificados de modo a reduzir os riscos.

- Registro dos resultados

O registro dos resultados obtidos no decorrer do estudo de uma planta é uma parte importante do HazOp. Os desvios gerados pela aplicação das palavras-guia aos parâmetros de processo, bem como suas causas, consequências e ações necessárias devem ser registrados adequadamente.

É aconselhável o registro completo de todos os aspectos do estudo, mesmo que as consequências de um desvio da intenção de operação sejam triviais. Quando um desvio não é passível de ocorrência em condições reais de operação, as razões pelas quais esta situação não é possível devem ser registradas. Caso não seja possível uma análise completa de uma determinada situação, devido à falta de informações ou conhecimentos por parte da equipe, também deve-se registrar este fato. Caso existam correções imediatas a serem feitas no processo, estas também devem ser registradas. Enfim, toda e qualquer situação resultante do desenvolvimento do HazOp deve ser registrada, sendo que as informações contidas nestes registros devem ser claras e compreensíveis, principalmente por pessoas que não fizeram parte da equipe de estudo.

3.5.2. Análise de Árvore de Falhas (AAF)

A técnica da Análise de Árvore de Falhas (AAF) foi desenvolvida pelos laboratórios da *Bell Telephone*, em 1961, para avaliar a segurança do sistema de controle de lançamento dos mísseis Minuteman. Sua utilização atual abrange desde projetos de máquinas, equipamentos, análise de processos industriais ou administrativos, até análise de impactos ambientais de acidentes e situações anormais, dentro de processos de licenciamento de instalações industriais [16, 66].

Finalidades de uma AAF

De uma maneira geral, uma AAF visa basicamente reduzir a probabilidade de ocorrência de um evento indesejável e minimizar suas conseqüências através da sua identificação nas fases iniciais de um projeto ou operação de uma instalação. É uma ferramenta bastante útil para lidar com *eventos raros*, isto é, eventos com baixa probabilidade de ocorrência dentro de um determinado tipo de instalação. Como a frequência verificada deste tipo de evento é muito baixa, a análise pelos dados históricos é bastante difícil e uma técnica dedutiva, associando a probabilidade destes eventos com outras probabilidades de ocorrência, já conhecidas, é de grande valia.

As principais finalidades da realização de uma AAF são:

- Estabelecimento de um método padronizado de análise de problemas ou de falhas, verificando como estes eventos ocorrem em um equipamento ou processo;
- Análise da confiabilidade de sistemas, instalações, equipamentos, produtos ou processos;
- Estabelecimento de prioridades nas ações corretivas ou mitigadoras que deverão ser tomadas em cada instalação particular;
- Compreensão das causas e modos de falha de um sistema, através de um processos dedutivo;
- Análise de projeto e alternativas de projeto de sistemas de segurança;
- Auxílio na elaboração de procedimentos de manutenção, testes e inspeções (inspeção baseada em risco [67]);
- Identificação dos pontos fracos dos sistemas, isto é, dos componentes mais críticos ou condições críticas de operação;

- Obtenção de informações para treinamento na operação de equipamentos ou instalações, em especial daqueles resultantes de novos projetos;
- Auxílio nos processos de simplificação e otimização de equipamentos ou instalações, o que pode ser feito ainda na fase de projeto.

Estrutura de uma Árvore de Falhas

Uma árvore de falhas é um modelo gráfico que permite mostrar, de uma forma clara e simples, o encadeamento de diferentes eventos que podem resultar em um “evento topo”. A análise se inicia a partir de uma falha ou problema particular que se deseja estudar (“evento topo”), e continua com a elaboração de uma seqüência ou combinação de fatos capazes de conduzir a tal evento. Um “evento topo” pode ser definido como um estado do sistema considerado anormal.

A análise é conduzida até atingir os eventos ou situações básicas onde não é mais necessária aprofundar a análise. Estes eventos determinam o “limite de resolução” da árvore. A análise parte do evento topo e desce até as causas básicas responsáveis por ela, denominadas de “causas primárias”. São avaliações tipicamente *top-down* (de cima para baixo).

A Figura 3.8 apresenta a estrutura de uma árvore de falhas, e as Tabelas 3.15 e 3.16 apresentam os símbolos de portas lógicas e os símbolos de eventos, respectivamente, utilizados na construção das árvores de falhas [68].

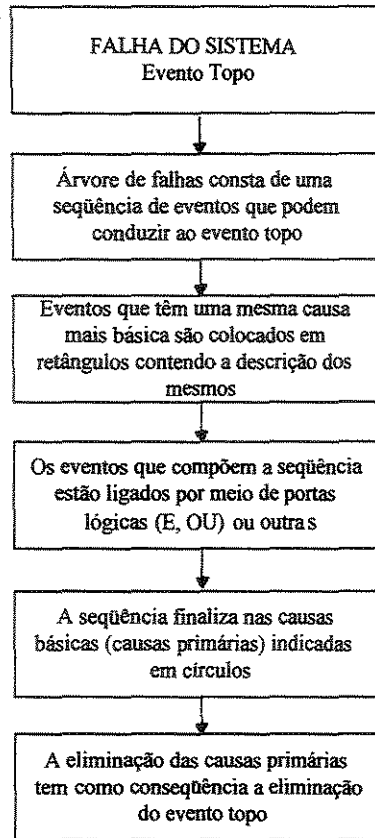
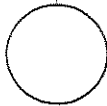
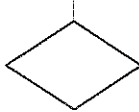
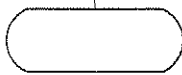


Figura 3.8 - Estrutura de uma árvore de falhas [68].

Tabela 3.15 - Símbolos de portas lógicas utilizados na construção das árvores de falhas [68].

SÍMBOLO	NOME	RELAÇÃO CAUSAL
	E	Evento de saída só ocorre se todos os eventos de entrada ocorrerem
	OU	Evento de saída ocorre se pelo menos um dos eventos de entrada ocorrer
	INIBIÇÃO (CONDICIONAL)	Evento de entrada só conduz ao eventos de saída se o condicional ocorrer
	E DE PRIORIDADE	Evento de saída ocorre se os eventos de entrada ocorrerem na ordem da esquerda para a direita
	OU EXCLUSIVA	Evento de saída ocorre se apenas um dos eventos de entrada ocorrer
	M EM N	Evento de saída ocorre se m em n dos eventos de entrada ocorrerem

Tabela 3.16 - Símbolos de eventos, utilizados na construção das árvores de falhas [69].

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
	Eventos que são saídas de portas lógicas
	Eventos associados a falhas básicas (causas primárias)
	Eventos não realizados (omitidos) para a árvore de falhas em estudo (considerados primários)
	Parâmetro associado a um evento que deve ser monitorado
	Evento condicional, usado em janela de inibição
	Indica a conexão com outro símbolo ou evento, em diferentes partes da árvore de falhas

Construção das Árvores de Falhas

Para ilustrar o processo de construção de uma árvore de falhas foi escolhido um exemplo do cotidiano, um evento topo indesejável “motor de um carro não dá partida”. A Figura 3.9 apresenta um *diagrama de causa e efeito*, escolhido como um primeiro passo para elaborar a árvore. Este diagrama permite associar um efeito às suas possíveis causas, sem no entanto fornecer a relação causal.

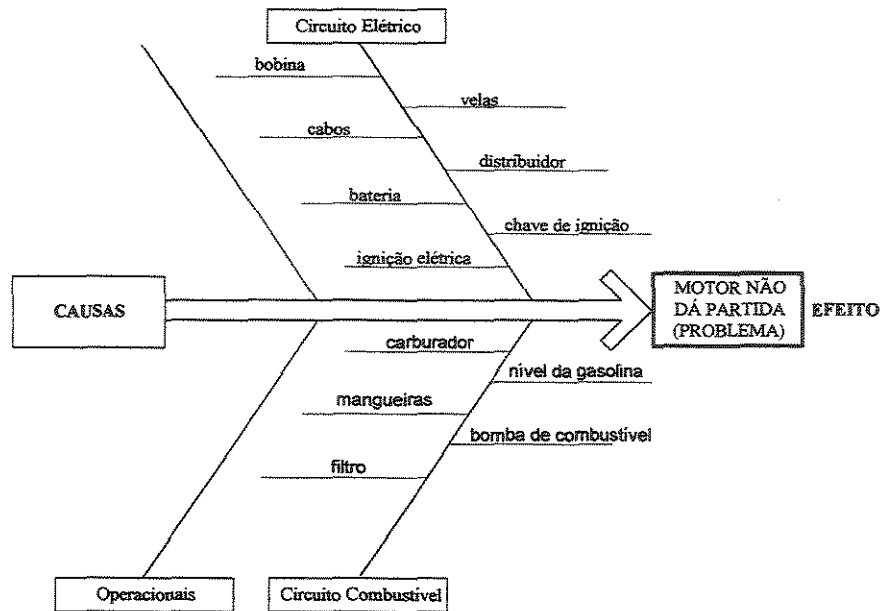


Figura 3.9 - Diagrama de causa e efeito mostrando alguns dos aspectos do problema relacionado ao evento topo "motor não dá partida" [68].

A árvore de falhas construída é apresentada na Figura 3.10. Nota-se que o evento topo é desenvolvido até suas causas primárias, mostradas como círculos. As causas primárias são caminhos de falha e o seu bloqueio inviabiliza este caminho. O bloqueio de todas as causas primárias de um evento topo "fechará" todos os possíveis caminhos de falha.

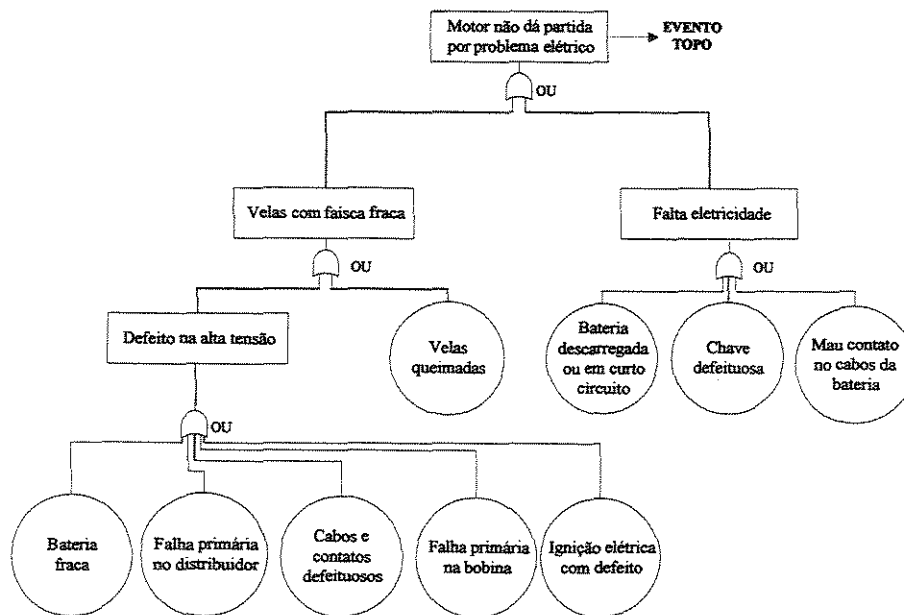


Figura 3.10 - Árvore de falhas para o problema relacionado ao evento topo "motor não dá partida" [68].

Procedimento para Realizar uma AAF

O procedimento para realizar uma AAF é detalhado na Figura 3.11.

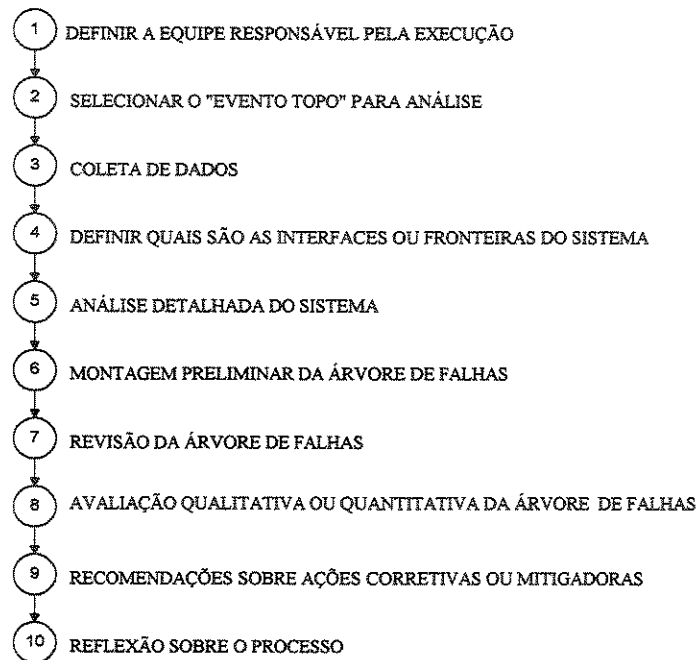


Figura 3.11 - Fluxograma da sequência de procedimentos para realizar uma AAF [68].

O processo se inicia pela definição da *equipe responsável* pela execução. Esta equipe deve ser multidisciplinar e multihierárquica, envolvendo projetistas, engenheiros de manutenção, de segurança, supervisores, engenheiros de materiais, técnicos de confiabilidade, etc. Deve ser elaborado um cronograma, prevendo as etapas e os prazos na execução dos trabalhos.

Os *eventos topos* selecionados para análise devem:

- representar eventos indesejáveis;
- serem mensuráveis ou quantificáveis;
- serem passíveis de ser controlados, minimizados ou bloqueados mediante providências técnicas ou administrativas;
- terem suas causas conhecidas (ramificações das árvores de falhas).

Às vezes um evento topo é claramente identificável, por sua relevância, gravidade ou frequência. Caso contrário deve ser feita uma lista das possíveis falhas, discutida com a equipe, classificada segundo critérios de danos às pessoas, equipamentos, processos ou meio ambiente. A seleção deve se basear, o máximo possível, em dados coletados sobre

falhas já ocorridas, evitando seleções baseadas na intuição ou interesse particular de algum membro da equipe.

Na fase de *coleta de dados* devem ser reunidas todas as informações possíveis sobre o sistema, tais como esquemas de projeto, projetos detalhados, desenhos, memórias de cálculo, especificações de materiais, fluxogramas de processo, normas, procedimentos de ensaio, inspeção, manutenção e testes, relatórios de falhas, banco de dados de falhas em instalações semelhantes, etc.

Para prosseguir na análise é necessária a *definição das interfaces ou fronteiras do sistema*. Para tanto, devem ser identificados os fatores externos ao sistema, que não serão considerados (por exemplo, falta de energia elétrica, uso inadequado de equipamentos, sabotagem, etc.). Devem também ser identificados os componentes e equipamentos que não serão analisados.

Na *análise detalhada do sistema* podem ser elaborados diagramas de causa e efeito ou diagramas de bloco para verificar como a falha de um componente afeta os demais. No exame das causas de falhas consideradas podem ser utilizados as ferramentas da Qualidade Total como os ciclos PDCA [68].

Na *montagem e revisão da árvore de falhas* deve-se procurar utilizar o menor número possível de ramificações nos ramos mais altos da árvore, expandindo-a nos níveis mais baixos, que são as suas causas. Deve-se verificar se a árvore pode ser simplificada (ver exemplo apresentado na Figura 3.12) e fazer uma análise de consistência, através da seguinte questão:

Se esta causa primária acontecer, o evento de nível mais alto acontece?

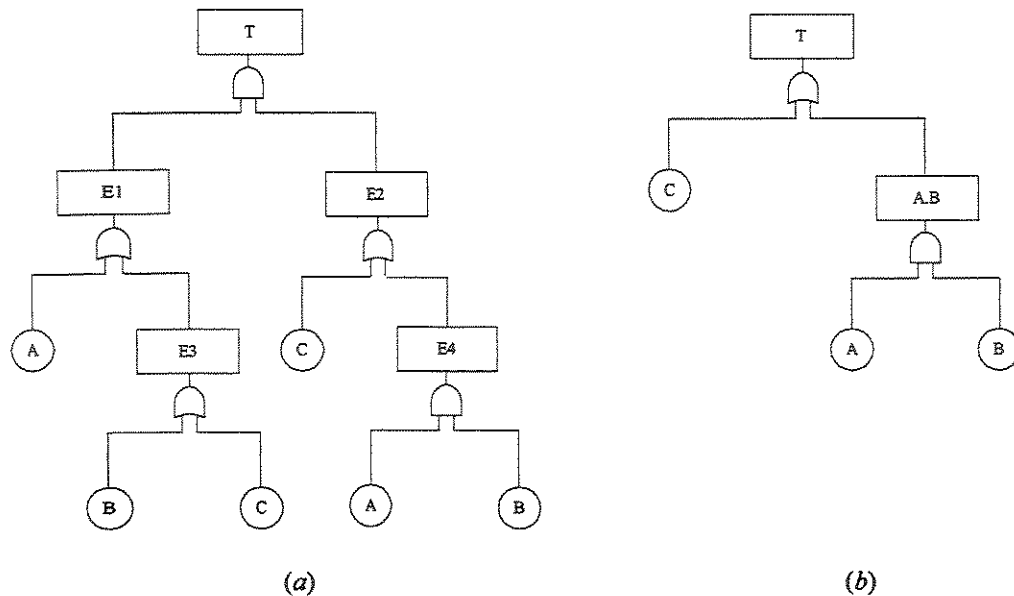


Figura 3.12 - Árvore de falhas (b) equivalente a uma mais complexa (a) [70].

A avaliação da árvore de falhas pode ser qualitativa ou quantitativa. Na avaliação quantitativa é necessário o *cálculo da probabilidade de falha do evento topo* a partir dos dados das causas primárias. Para isto devem ser atribuídos valores de probabilidades de falha a estes eventos a partir de dados técnicos de literatura, análise de históricos de falhas e análise de pessoal de engenharia de confiabilidade. Deve ser destacado que, na impossibilidade de realização de uma avaliação quantitativa da árvore de falhas, devido à ausência de dados sobre as causas primárias, uma avaliação qualitativa, envolvendo a determinação da relação funcional entre os eventos que conduzem ao evento topo, é, muitas vezes, suficiente para os propósitos da análise.

Nas fases de recomendações e reflexão sobre o processo devem ser feitas recomendações sobre as providências para bloquear as causas primárias identificadas, estabelecer prioridades, elaborar planos de ação, encaminhar sugestões aos responsáveis pela instalação ou projeto e documentar todo o processo. Este processo é também importante para definir as ações mitigadoras para o evento topo.

Avaliação de uma Árvore de Falhas

Uma análise dos eventos e suas combinações lógicas mostrados nas árvores de falhas se constitui em uma ferramenta poderosa para descobrir problemas. Esta análise certifica, por exemplo, se não existe uma falha de um único elemento capaz de provocar o

evento topo analisado (critério da falha única) servindo para indicar o grau de segurança do produto ou sistema analisado [68].

Uma análise qualitativa de uma Árvore de Falhas pode determinar os seguintes elementos:

- cortes mínimos (*minimal cut sets*);
- partes críticas do sistema;
- uma classificação dos eventos críticos de acordo com sua importância.

Uma avaliação quantitativa da árvore de falhas é normalmente realizada atribuindo dados de probabilidade de falhas (por tempo ou por demanda) aos eventos primários e a determinação da probabilidade de ocorrência do evento topo. São também pontos importantes nesta análise a avaliação da incerteza dos resultados da probabilidade de ocorrência do evento topo, originada da propagação das incertezas dos valores de probabilidades dos eventos primários ao longo da árvore, a avaliação quantitativa da importância de cada elemento primário da árvore e a avaliação de sensibilidade [70].

Determinação dos Cortes Mínimos

A combinação de eventos primários suficiente para ocasionar a ocorrência do evento topo é denominada de *corte mínimo*. Logo, se todos os eventos primários de um corte mínimo ocorrer, o evento topo também ocorrerá [70].

Em árvores de falhas com um pequeno número de componentes é fácil a determinação dos cortes mínimos, através de regras simples da álgebra booleana. No entanto, em árvores de falhas mais complexas, o número de combinações dos eventos primários pode chegar a milhares (ou milhões) o que faz com que esta tarefa só possa ser realizada com *softwares* desenvolvidos especificamente para este fim [9].

3.5.3. Análise de Modos de Falha e Efeitos (AMFE)

A Análise de Modos de Falhas e Efeitos (AMFE) é um método de análise de projetos (produtos ou processos, industriais ou administrativos) utilizado para identificar os possíveis modos potenciais de falha do sistema e determinar o efeito de cada um sobre o seu desempenho, através de um raciocínio dedutivo [68].

O seu desenvolvimento é formalmente documentado e permite [70]:

- a padronização de procedimentos;
- fazer registro histórico de análise de falhas (poderá ser usado em outras revisões do produto ou processo e busca de ações corretivas para sistemas similares);
- modificar o projeto, através da seleção e priorização de melhorias.

Na AMFE, ao contrário da AAF, o raciocínio é de “baixo para cima” (*bottom-up*) através da determinação dos modos de falhas dos componentes mais simples, suas causas e as maneiras que eles afetam os níveis superiores do sistema. Na AMFE procura-se basicamente respostas para as seguintes perguntas:

- De quais maneiras um componente pode falhar?
- Que tipos de falhas são observadas?
- Que partes do sistema são afetadas?
- Quais são os efeitos da falha sobre o sistema?
- Como preveni-las?

Os resultados da AMFE são registrados em um formulário padronizado, como o exemplo apresentado na Figura 3.13.

			1 A.M.F.E. – ANÁLISE DE MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS ☐ PROJETO DE PRODUTO ☐ PROJETO DE PROCESSO ☐ REVISÃO DO PROJETO DO PRODUTO ☐ REVISÃO DO PROJETO DO PROCESSO										DIVISÃO					
													FOLHA					
CLIENTE/REF. 2			APLICAÇÃO			ÁREAS ENVOLVIDAS				DATA DA ELABORAÇÃO								
DATA DA ÚLTIMA REVISÃO DO PROJETO			PRODUTO/PROCESSO			FORNECEDOR				DATA DA PRÓXIMA REVISÃO								
ITEM	NOME DO COMPONENTE/PROCESSO	FUNÇÃO DO COMPONENTE/PROCESSO	FALHAS POSSÍVEIS			ATUAL					AÇÃO CORRETIVA		RESULTADO					
			MODO	EFEITO(S)	CAUSAS	CONTROLES ATUAIS	ÍNDICES				RECOMENDAÇÕES	TOMADA	ÍNDICES REVISTOS				RESPONSÁVEL	
							O	G	D	R			O	G	D	R		
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA			GRAVIDADE			PROBABILIDADE DE DETECÇÃO					RISCO							
- MUITO REMOTA 1			- APENAS PERCEPTÍVEL 1			- MUITO ALTA 1					- BAIXO 1 a 135							
- MUITO PEQUENA 2			- POUCA IMPORTÂNCIA 2, 3			- ALTA 2, 3					- MODERADO 136 a 500							
- PEQUENA 3			- MODERADAMENTE GRAVE 4, 5, 6			- MODERADA 4, 5, 6					- ALTO 501 a 1000							
- MODERADA 4, 5, 6			- GRAVE 7, 8			- PEQUENA 7, 8												
- ALTA 7, 8			- EXTREMAMENTE GRAVE 9, 10			- MUITO PEQUENA 9												
- MUITO ALTA 9, 10						- REMOTA 10												

Figura 3.13 - Exemplo de formulário para registro dos resultados da AMFE [68].

Utilização dos Formulários de AMFE

O preenchimento dos formulários de AMFE é uma das etapas do emprego da técnica.

Campo 1 – Identificação da AMFE: Produto ou Processo

É importante que se faça a distinção entre uma AMFE de produto e de processo. Para um exemplo de um item como “carcaça do eixo traseiro de um veículo”, um modo de falha poderia ser fratura, e o efeito a perda do freio ou do controle do veículo. Para identificar a causa é necessário lembrar se a AMFE é de produto ou de processo. Se for de produto, as causas de falha são aquelas devido a problemas de projeto, como mau dimensionamento, desconhecimento do estado de tensões da peça, especificação inadequada do material, etc. Se forem consideradas causas das falhas decorrentes de inadequação no processo de fabricação, como “formação de bolhas no material durante a fundição”, ainda que a falha e a consequência sejam as mesmas, isto diz respeito ao processo de fabricação, e a falha iria ocorrer mesmo que o projeto fosse perfeito.

Campo 2 – Registro de Dados

Devem ser registradas as informações básicas que podem facilitar a identificação posterior do produto, processo ou AMFE realizada, incluindo, por exemplo: nome do produto e número de série; identificação da etapa; datas de liberação, revisão de projeto; data de realização da AMFE, responsáveis, etc. Deve ser estabelecido um procedimento operacional para registrar estes dados.

Campo 3 – Item

Devem ser enumerados apenas os itens considerados. Para cada item devem ser preenchidos os campos de 4 a 20 (Figura 3.13):

- Nome de cada componente ou etapa do processo;
- Função de cada componente ou etapa do processo. A resposta à questão “Qual é o propósito do componente ou operação?” auxiliará no processo;
- Modos (tipos) de falha: são os eventos que levam a uma diminuição parcial ou total da função do produto e suas metas de desempenho; A resposta à questão

“De que maneira este processo pode fracassar na sua função estabelecida?” auxiliará o processo. Sob a ótica da Qualidade Total os elementos básicos que compõem um sistema são: qualidade intrínseca, custo, segurança e prazo de entrega [68];

- Efeitos das falhas: são as formas como os modos de falha afetam o desempenho do sistema, do ponto de vista do cliente. A resposta à questão “O que acontecerá se ocorrer o tipo de falha descrito?” auxiliará no processo;
- Causas das falhas: são os eventos que provocam o aparecimento do tipo (modo) de falha identificado. A questão básica é “Quais variáveis do processo podem provocar este modo de falha?”. Deve-se buscar a causa fundamental. A Figura 3.14 mostra a relação entre causa, modo e efeito de falha de um sistema [68].

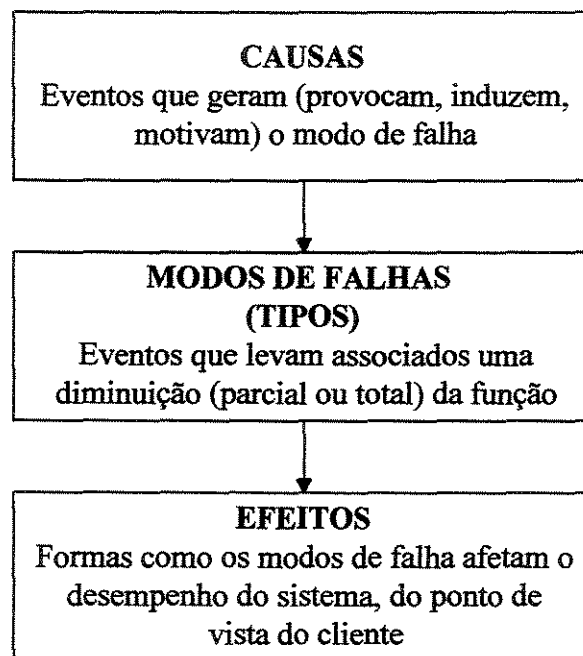


Figura 3.14 - Relação entre Causa, Modo e Efeito de Falha [68].

- Controles atuais: controles implementados durante elaboração do projeto ou no acompanhamento do processo para prevenir ou detectar falhas, verificar ou rever projetos, confrontação com normas técnicas, inspeção e ensaios, etc.

- Índice de ocorrência: é uma estimativa das probabilidades de ocorrência de uma causa de falha e dela resultar o tipo de falha no produto ou processo. Devem ser utilizados relatórios de falhas, históricos de manutenção, gráficos de controle, dados obtidos de literatura ou fornecedores, etc. A parte inferior do formulário apresenta um critério para estimar este índice com base em informações qualitativas.
- Índice de gravidade: é um índice que deve refletir a gravidade do efeito da falha sobre o cliente, assumindo que o tipo de falha ocorra. A atribuição deste índice deve ser feita olhando para o efeito da falha e avaliando o quanto ele pode incomodar o cliente. A parte inferior do formulário apresenta um critério para estimar este índice com base em informações qualitativas.
- Índice de detecção: é o índice que avalia a probabilidade da falha ser detectada antes que o produto chegue ao cliente. A atribuição deste índice deve ser feita olhando-se para o conjunto modo - efeito de falha e os controles atuais exercidos. A parte inferior do formulário apresenta um critério para estimar este índice com base em informações qualitativas.
- Índice de risco: deve indicar as falhas que deverão ser tratadas prioritariamente e para as quais deve ser feito um plano de ação para o estabelecimento de contramedidas. Pode ser avaliado como o produto do Índice de Gravidade x Índice de Ocorrência x Índice de Detecção. A parte inferior do formulário apresenta uma classificação do risco como baixo, moderado ou alto, em função do produto dos três índices acima.
- Ações preventivas recomendadas – ações para bloqueio da causa da falha ou diminuição da sua gravidade ou ocorrência.
- Ações preventivas efetivamente adotadas.

Os demais campos do formulário deverão ser preenchidos após ter sido concluída a análise via AMFE e implementadas as ações preventivas recomendadas. Existem *softwares* que facilitam o preenchimento deste tipo de formulário.

Seqüência de Procedimentos para Elaboração de uma AMFE

Após a definição da equipe responsável pela execução da AMFE, devem ser definidos os itens do sistema que serão considerados. As seguintes questões auxiliarão na escolha:

- Sobre que componentes a equipe tem menor conhecimento?
- Quais componentes ou etapas têm apresentado mais falhas?
- Quais componentes ou etapas são considerados mais críticos (maior importância)?

A Figura 3.15 apresenta um fluxograma para elaboração da AMFE., considerando os itens selecionados [71].

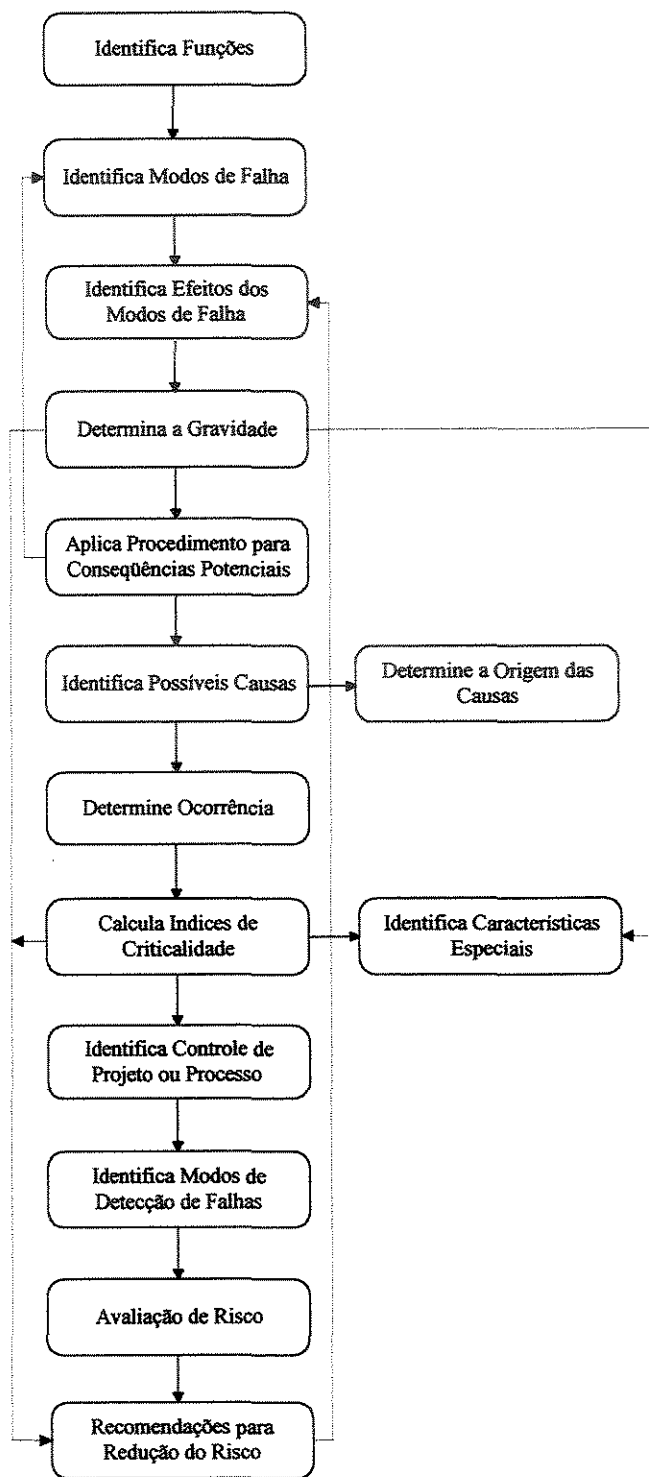


Figura 3.15 - Fluxograma para elaboração de uma AMFE [71].

A elaboração de diagramas de causa e efeito auxilia na identificação dos modos e efeitos de falha. Para a identificação das causas, podem ser utilizadas AAF, caso tenham sido realizadas.

As recomendações para a redução de risco devem incluir um plano de ação para:

- Reduzir a probabilidade de ocorrência de uma falha;
- Reduzir a gravidade de um modo de falha;
- Aumentar a probabilidade de detecção da falha, caso ocorra.

O aumento dos controles não é uma ação corretiva positiva e deve ser usado como um recurso extremo e temporário. Todos os esforços deverão ser orientados preferencialmente no sentido de diminuir a ocorrência de falhas, mais do que detectá-las.

3.5.4. *What-If/Checklist* (WIC)

O *What-If/Checklist* (WIC) é uma técnica ainda pouco utilizada no Brasil, embora, principalmente nas indústrias de processo, sua importância seja inegável para qualquer atividade produtiva. Trata-se de uma técnica sistemática e estruturada para detectar os riscos de forma exaustiva e é uma boa ferramenta para ser utilizada como primeira abordagem na avaliação de riscos [72].

O WIC é um procedimento de revisão de um largo espectro de riscos de processos, que busca um consenso entre as áreas de produção, processo e segurança, sobre as formas de atuar rumo à operação segura.

A etapa inicial do processo é a formação de um comitê de revisão de riscos envolvendo supervisor de operação, engenheiro de projeto, engenheiro do grupo técnico de processo, operador experiente e engenheiro de segurança.

Informações necessárias para a realização de um WIC

As seguintes informações são necessárias para a realização de um WIC [72].

- Instruções de operação do processo;
- Memória de cálculo de instalações e equipamentos;
- Relação de alarmes e intertravamentos;
- Relatórios de incidentes;
- Padrões técnicos de processo;
- Diagramas elétricos, lógicos e de instrumentação.

Questões para análise de riscos potenciais

Devem ser elaboradas previamente, tendo em vista as informações já coletadas, questões para se realizar a revisão de segurança de determinada operação ou produção. São

apresentados, a seguir, questões relativas a aspectos importantes quanto à segurança, que poderiam ser utilizados em um WIC [72].

Questões sobre o processo de fabricação:

- Os materiais foram classificados como “perigosos” ou “inofensivos”?
- Foi feita alguma avaliação sobre possível decomposição ou reação química descontrolada?
- Quais são as precauções necessárias para satisfazer as exigências ambientais e de saúde dos funcionários?
- Quais os riscos existentes de poeiras explosivas?
- Quais mudanças ocorrem na composição da matéria-prima e que mudanças acarretaram no processo?
- Quais agentes extintores de incêndio são compatíveis com o material utilizado?
- Como são isoladas as reações potencialmente perigosas?
- Que misturas inflamáveis podem ocorrer dentro do equipamento?
- Quais reações perigosas que podem se desenvolver, ocasionadas por falha de algum equipamento (bomba, agitador, etc.)?
- Que matérias-primas ou materiais em processos de fabricação podem ser adversamente afetados por condições climáticas extremas?
- Qual o potencial de que incêndios externos possam gerar condições internas perigosas para a produção?
- Que medidas de segurança são adotadas na área de estocagem?
- Materiais frágeis, como o vidro, estão adequadamente protegidos para minimizar quebras e reduzir riscos?
- Os visores de observação têm capacidade para agüentar possíveis sobrepressões geradas?
- Quais válvulas ou botões de emergência não podem ser alcançados rápida e seguramente?
- Que providências foram tomadas para dissipar a eletricidade estática a fim de evitar o centelhamento?
- Todos os vasos pressurizados foram construídos conforme exigências de normas nacionais e estrangeiras aplicáveis?

- Quais riscos irão se desenvolver quando todos os tipos de fonte de alimentação utilizada na instrumentação falharem quase que simultaneamente?
- Se todos os instrumentos falharem simultaneamente, a instalação ainda continuará segura (*fail-safe*)?
- Quais os efeitos do excesso de umidade e de temperatura na instrumentação?
- Há técnicas novas sendo aplicadas no trabalho?
- A iluminação é adequada para uma operação segura?
- Que procedimentos foram instalados para teste e verificação sobre o funcionamento dos instrumentos?
- Quando a norma de procedimento de operação foi revisada a última vez?
- Como os novos funcionários ligados à operação são treinados nas operações iniciais, e como os funcionários experientes conservam-se em dia com o planejamento dos procedimentos de operação, especialmente quanto a partidas, paradas, imprevistos ou emergências?
- Que exigências de limpeza existem antes das partidas e como são verificadas?
- Que riscos de segurança são introduzidos pelos procedimentos de manutenção de rotina?
- Que riscos são ocasionados pela perda de cada alimentação e pela perda simultânea de duas ou mais alimentações?
- Qual é o incidente mais grave, isto é, a pior combinação concebível e razoável de maus funcionamentos que pode ocorrer?
- Os equipamentos foram adequadamente espaçados e localizados para permitir manutenção antecipada durante a operação, sem perigo para o processo?
- Na ocorrência de tipos previsíveis de derramamentos e liberações que perigos existem para a comunidade?
- Qual a responsabilidade civil envolvida com a liberação de névoas, dispersões, fumos, ruídos, etc., e como ela tem sido controlada ou minimizada?

Questões sobre Tubulações, Máquinas e Equipamentos:

- Os sistemas de tubulação foram analisados quanto a tensões e movimentos devidos à expansão térmica?
- Os sistemas de tubulação são adequadamente suportados e guiados?

- Que providências foram tomadas para limpar toda a tubulação durante partidas e paradas?
- Os controladores e válvulas de controle estão em locais de fácil acesso para a manutenção?
- Foram previstos meios para testar e manter os elementos principais de alarme e intertravamentos?
- Que dispositivos existem para remoção, inspeção e substituição das válvulas de alívio e discos de ruptura, e qual o procedimento para esta operação?
- Qual a previsão para equipamentos de reservas ou peças de reposição para sistemas críticos sob o ponto de vista de segurança?

Questões sobre Proteção Contra Incêndio:

- O interior de edifícios conta com pontos de hidrantes com mangueiras?
- Que tipo de proteção foi providenciado para os líquidos inflamáveis estocados em tanque? Espuma? Diques com válvulas de drenagem na parte externa?
- As estruturas metálicas que suportam cargas, e que estariam potencialmente expostas a incêndios de gases ou líquidos inflamáveis, foram tornadas resistentes ao fogo até uma altura suficiente acima do solo, de modo a proteger a estrutura?
- Qual a capacidade de reservas de água para combate ao fogo? Qual a sua demanda máxima?
- Qual a proteção adotada contra riscos de explosões de pó?
- A área foi pavimentada de modo a conduzir líquidos derramados para longe de equipamentos?
- As unidades de operação estão adequadamente espaçadas de forma a diminuir os danos potenciais de incêndio e explosões nas unidades adjacentes, para permitir espaço para as atividades de combate ao fogo?

3.5.5. Análise Preliminar de Perigos (APP)

Também conhecida como Análise Preliminar de Riscos (APR) - *Preliminary Hazard Analysis (PHA)*, a APP é uma técnica que teve a sua origem na área militar e é parte integrante do programa de segurança padrão militar exigido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos desde 1984. O objetivo principal da técnica é identificar os possíveis perigos que possam ocorrer em uma instalação industrial, numa *fase preliminar*

do projeto e, com isto, economizar tempo e despesas no eventual replanejamento destas unidades [1, 5].

É possível aplicar esta técnica para se fazer avaliações rápidas dos perigos e direcionar a aplicação de outras técnicas de identificação de perigos mais detalhadas e que serão aplicadas em fases posteriores da vida útil da planta. A utilização da APP não significa que não será realizada outra avaliação de riscos. Ao contrário, ela deve preceder uma avaliação quantitativa de risco subsequente, quando necessária.

O método é uma revisão superficial de problemas gerais de segurança. Assim, enquanto o projeto é realizado, os perigos principais identificados podem ser eliminados, minimizados ou controlados. A APP é realizada listando-se os perigos associados aos sistemas em estudo. Assim, devem ser identificados:

- Substâncias e equipamentos perigosos (produtos químicos altamente reativos, combustíveis, lubrificantes, substâncias tóxicas, explosivas, sistemas a alta pressão e outros sistemas armazenadores de energia);
- Fatores do meio ambiente que possam interferir nos equipamentos e materiais da instalação (descarga atmosférica, umidade, vibração, altas temperaturas);
- Interface entre equipamentos do sistema e as substâncias (início e propagação de incêndio, de explosão, sistemas de controle e parada de emergência);
- Procedimentos de operação, testes, manutenção e de emergência (dependência da confiabilidade humana, leiautes e acessibilidade de equipamentos, disponibilidade de equipamentos de proteção);
- Dispositivos técnicos de segurança (sistemas de alívio, redundância, EPI, recursos para extinção de incêndios).

Esta metodologia é normalmente utilizada como um guia estruturado para a elaboração de uma revisão de segurança que deverá ser bastante útil para um melhor conhecimento das condições gerais de segurança interna da instalação e seu impacto no ambiente vizinho, no caso de um acidente. A classificação de cada um dos perigos identificados é feita através da norma militar americana MIL-STD-882 (*System Safety Program Requirements*) [16].

Descrição do Método

A aplicação do método é feita através do preenchimento de uma planilha padrão para cada subsistema da instalação, como o exemplo o apresentado na Figura 3.16 [73].

Área: Operação		Cliente: GASBRAS		Rev.: 01			
Subsistema: Linha lateral L1		Data: 10/08/2002					
Doc. Ref.:							
Perigo	Causa(s)	Efeito(s)	Categ. Conseq.	Categ. Probab.	Valor Risco	Medidas Prev/Mit.	Hipótese
1	2	3	4	5	6	7	8
Acúmulo de gás na caixa de válvula	Vazamento através de flanges/gaxetas	Possibilidade de ocorrência de explosão confinada	II	C	VRB	- isolar a área antes de iniciar a abertura da caixa de válvulas - Divulgar o telefone de emergência - Acionar o plano de ação emergencial	1
Categoria de Consequência			Cat. de Prob. de Ocorrência		Valor do Risco		
I – Desprezível			A – Provável		VRC – Crítico		
II – Marginal			B – Razoavelmente Provável		VRS – Sério		
III – Crítica			C – Remota		VRM – Moderado		
IV – Catastrófica			D – Extremamente Remota		VRB – Baixo		
					VRD - Desprezível		

Figura 3.16 - Exemplo de planilha para aplicação da técnica APP (baseada em [73]).

Coluna 1: Perigo

Nesta coluna deverão ser identificados os perigos para cada um dos subsistemas em estudo, ou seja, os eventos que podem provocar danos aos operadores, meio ambiente e público em geral (por exemplo, incêndio, explosão, liberação de materiais tóxicos, corrosivos).

Coluna 2: Causa(s)

Causa é o evento ou sequência de eventos que produzem um efeito. As causas básicas de cada perigo devem incluir tanto as falhas intrínsecas de equipamentos quanto erros de operação, manutenção, testes, reparos, eventos externos e fenômenos naturais.

Coluna 3: Efeito(s)

É o resultado de uma ou mais causas.

Coluna 4: Categorização das Conseqüências

A hierarquização sugerida para as conseqüências é apresentada na Tabela 3.17 [1].

Tabela 3.17 - Categoria das conseqüências para ser utilizada em APP [1].

Categoria	Descrição
I Desprezível	A falha não resultará em uma maior degradação do sistema. Nenhuma lesão é esperada, não contribuindo para um aumento do risco do sistema.
II Marginal	A falha irá degradar o sistema em uma certa extensão, sem, no entanto, comprometê-lo seriamente, nem causar lesões graves (danos controláveis).
III Crítica	A falha causará danos substanciais ao sistema, provocando lesões e resultando em risco inaceitável (são requeridas ações preventivas e corretivas imediatas).
IV Catastrófica	A falha produzirá severa degradação ao sistema e ao meio ambiente, resultando em sua perda total, lesões graves ou mesmo mortes (são requeridas ações preventivas e corretivas imediatas).

Coluna 5: Categoria de Probabilidade de Ocorrência

Esta coluna deve seguir a seguinte hierarquização:

- A - Provável – Possível de ocorrer mais de uma vez durante a vida útil da instalação;
- B - Razoavelmente Provável – Esperado de ocorrer pelo menos uma vez durante a vida útil da instalação;
- C - Remota – Provável de ocorrer durante a vida útil da instalação;
- D - Extremamente Remota – Não esperado de ocorrer durante a vida útil da instalação.

Coluna 6: Valor do Risco

A avaliação qualitativa do risco é efetuada através da combinação de pares ordenados formados pela categorização da consequência e da probabilidade de ocorrência do evento, obtendo-se uma matriz de riscos (baseada em [73, 74]), como o exemplo apresentado na Figura 3.17, a qual fornece uma indicação qualitativa do nível de risco. São os seguintes pares ordenados:

Valor de Risco Crítico - VRC: pares ordenados (IV,A) (IV,B) (III,A) ;

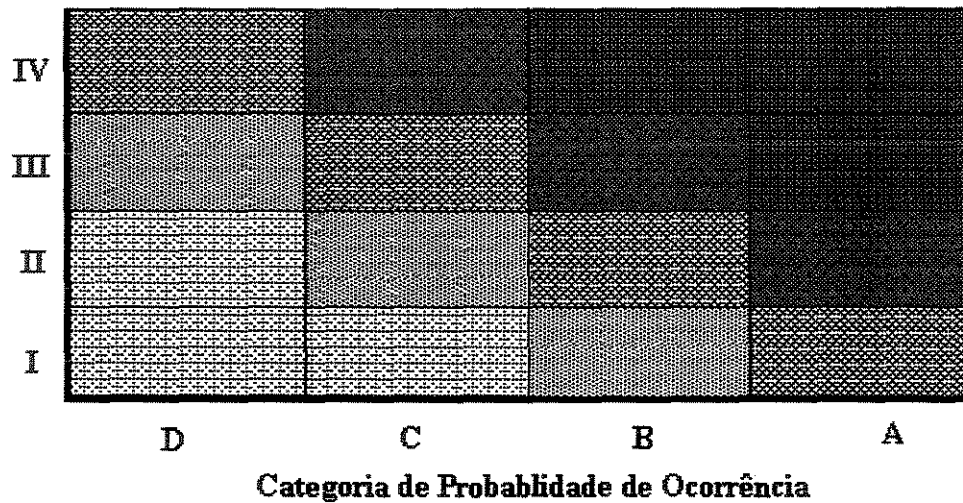
Valor de Risco Sério – VRS: pares ordenados (II,A) (III,B) (IV,C);

Valor de Risco Moderado – VRM: pares ordenados (I,A) (II,B) (III,C) (IV,D);

Valor de Risco Baixo – VRB: pares ordenados (I,B) (II,C) (III,D) e

Valor de Risco Desprezível – VRD: pares ordenados (I,C) (I,D) (II,D).

**Categoria de
Consequência**



LEGENDA

Valor de Risco Desprezível	Valor de Risco Baixo	Valor de Risco Moderado	Valor de Risco Sério	Valor de Risco Crítico

Figura 3.17 - Exemplo de uma matriz de risco (baseada em [73, 74]).

Coluna 7: Medidas Preventivas ou Mitigadoras

São as medidas de proteção ou para minimizar as consequências dos possíveis acidentes, sugeridas pela equipe que participou da elaboração da APP. Esta coluna pode ser também preenchida com quaisquer observações adequadas para a redução dos riscos.

Coluna 8: Número da Hipótese

Numeração seqüencial da hipótese de perigo analisada.

Após o preenchimento de uma planilha de APP, é elaborado um gráfico denominado Matriz Referencial de Risco, que é uma representação gráfica dos pares ordenados “Categoria de Probabilidade” e “Categoria de Consequência”, obtido para cada hipótese. Este gráfico serve como uma visualização dos riscos identificados e serve como um instrumento de decisão ao comparar e hierarquizar os perigos identificados.

3.5.6. Análise de Árvore de Eventos (AAE)

Análise de Árvore de Eventos (AAE) é uma técnica utilizada para desenvolver, de forma lógica, modelos visuais dos possíveis resultados de um evento iniciador. Como ilustrado na Figura 3.18, a análise de árvore de eventos usa árvores de decisão para criar os modelos. Os modelos exploram como as salvaguardas e influências externas, chamadas linhas de segurança, afetam a sequência do acidente [75].

Embora análise de árvore de eventos seja bastante útil na determinação das possíveis sequências de acidentes resultantes dos eventos iniciadores, esta técnica tem duas limitações [75]:

- **Limitação a um evento iniciador.** Uma árvore de eventos não é uma aproximação exaustiva para identificação das várias causas que podem resultar em um acidente. Outras técnicas de análise, como HAZOP, What/If, Checklist, ou AMFE, devem ser consideradas se o objetivo da análise for identificar as causas de acidentes potenciais.
- **Pode desprezar dependências de sistema complexos.** Os caminhos em cada ramo da AAE são condicionados aos eventos que aconteceram no ramo anterior desta AAE. Por exemplo, se não acontecer a ignição de uma substância inflamável liberada, não haverá nenhum fogo nas linhas de segurança subsequentes para ser combatido (por exemplo, sistemas de proteção contra incêndio). Desta forma, muitas dependências entre as linhas de segurança podem não ser consideradas. As linhas de segurança podem ter dependências complexas, como componentes comuns, sistemas de utilidade, operadores, etc. Estas dependências complexas podem ser facilmente desprezadas em análise de árvore de evento, levando a estimativas otimistas para os valores estimados para o risco.

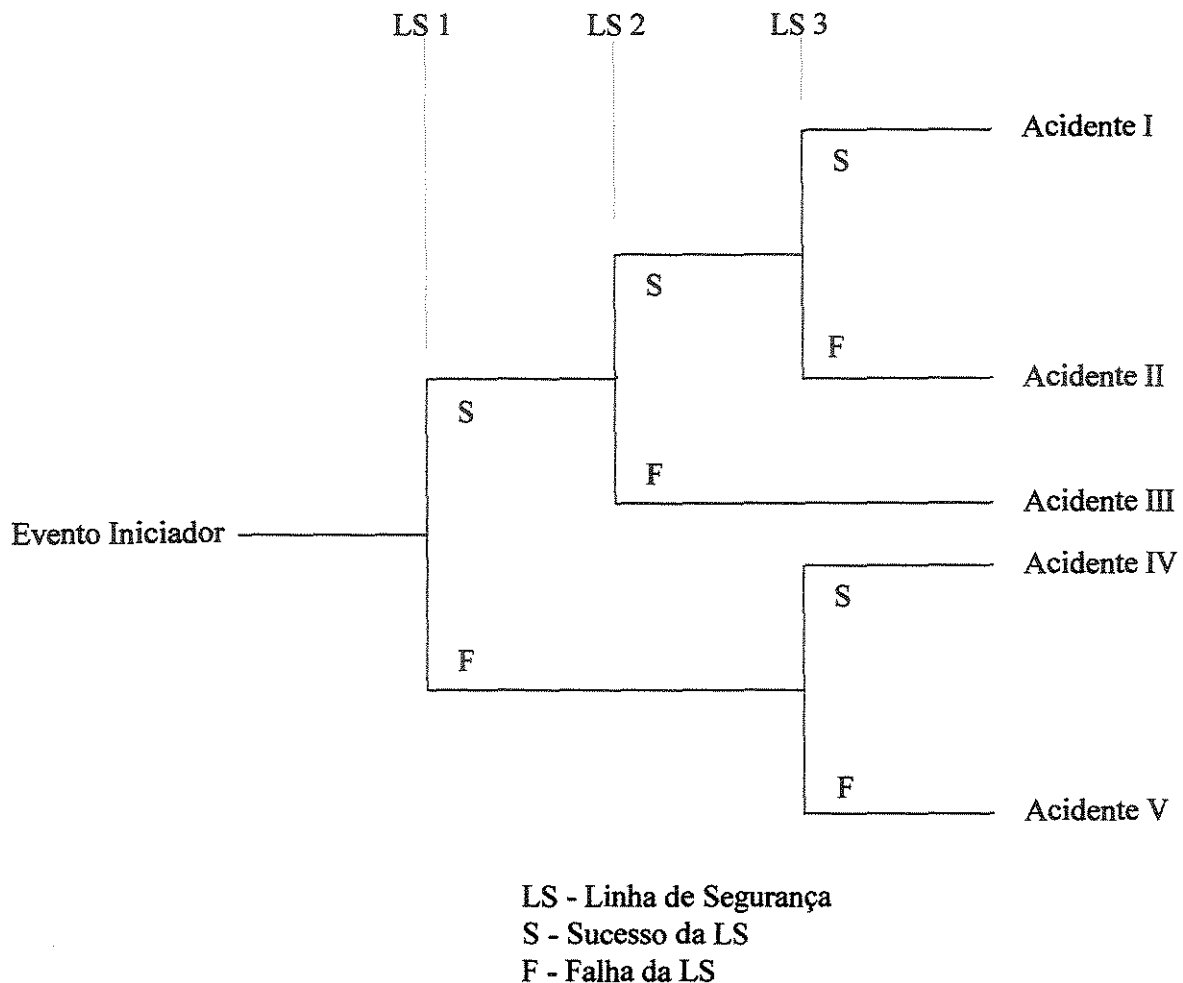


Figura 3.18 - Ilustração de um esquema de construção de uma árvore de eventos [75].

De uma maneira resumida a Análise de Árvore de Eventos pode ser definida como uma técnica que tem as seguintes características [75]:

- Modela os possíveis acidentes resultantes de um evento iniciador ou grupos de eventos iniciadores;
- É uma técnica de avaliação de riscos que efetivamente considera tempo, dependência, e efeito dominó entre vários eventos que podem contribuir para a seqüência de acidente, os quais podem ser difíceis de considerar em árvores de falhas;
- É uma técnica de análise que gera as seguintes informações:
 - descrições qualitativas de acidentes potenciais como combinações de eventos, que produzem vários tipos de acidentes a partir dos eventos iniciadores (gama de resultados);

- estimativas quantitativas de frequências de eventos ou probabilidades e importâncias relativas das várias seqüências de falhas e dos eventos contribuidores;
- lista de recomendações para reduzir os riscos e
- avaliação quantitativa da eficiência das recomendações.

Exemplo

A árvore de eventos apresentada na Figura 3.19 ilustra as várias conseqüências que podem resultar de um vazamento de óleo combustível, proveniente de uma ruptura da tubulação de um vaso em uma instalação. A primeira ramificação descreve os dois caminhos potenciais, dependendo se material inflamável entra ou não em contato com uma fonte de ignição. Se o material entra em contato com a fonte de ignição (mostrado na ramificação inferior da primeira linha de segurança), três sistemas estarão disponíveis para extinguir o fogo: extintores portáteis de incêndio, um sistema de CO₂, e um sistema hidrantes (baseado em [75]).

Sucessivos pontos de ramificação descrevem o sucesso ou falha de cada sistema. Deve-se notar que a ramificação superior em cada caso estende-se diretamente ao resultado porque, uma vez extinguido o fogo, não há nenhuma necessidade dos sistemas restantes operarem.

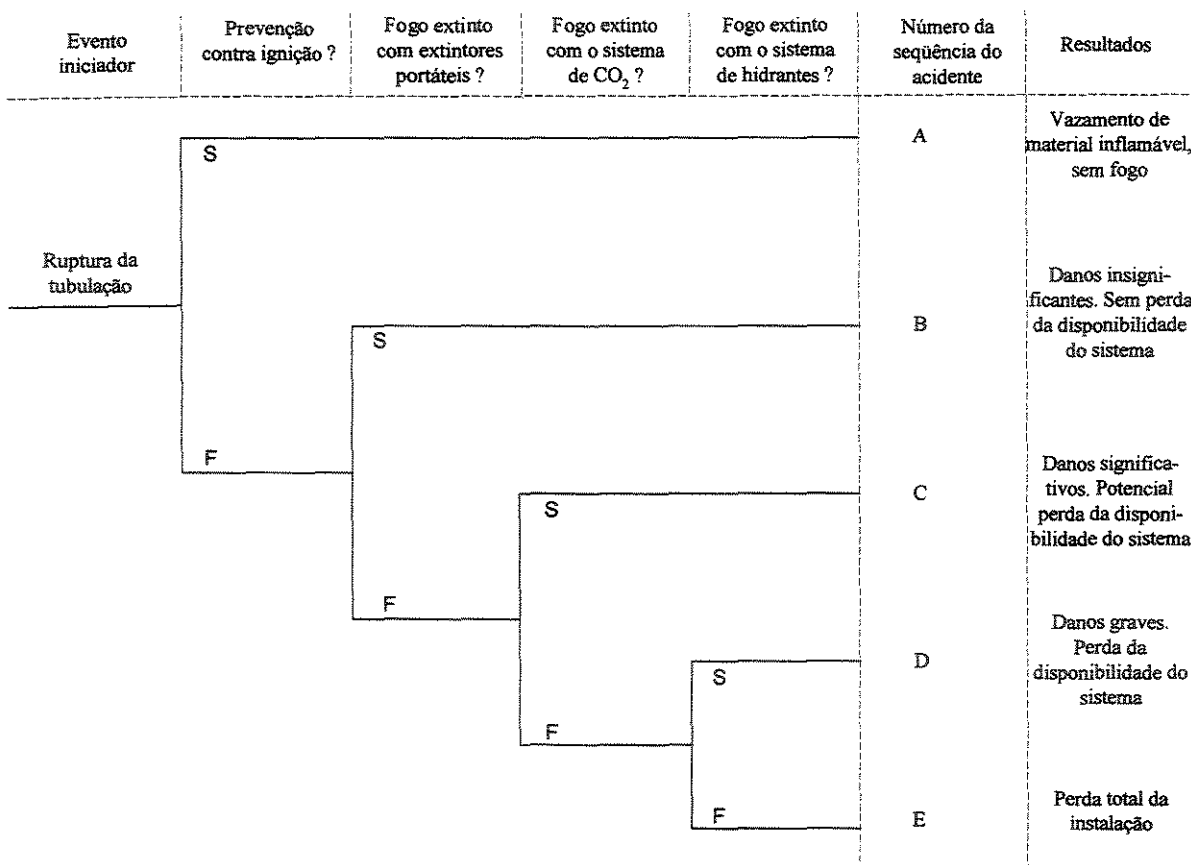


Figura 3.19 - Ilustração de uma árvore de eventos para o evento iniciador ruptura de uma tubulação de um vaso contendo material inflamável (baseada em [75]).

O processo de construção e análise de uma árvore de eventos consiste nos seguintes passos [75]:

1. **Definir o sistema ou atividade de interesse.** Deve-se definir de forma clara e específica os limites do sistema ou atividade para as quais serão executadas as análises de árvores de eventos;
2. **Identificar os eventos iniciadores de interesse.** Deve-se conduzir a avaliação de riscos para identificar os eventos de interesse ou grupo de eventos a que a análise se dirigirá;
3. **Identificar as linhas de segurança e fenômenos físicos.** Deve-se identificar as várias proteções (linhas de segurança) que irão mitigar ou influenciar as consequências do evento iniciador. Estas linhas de segurança incluem tanto os sistemas de engenharia como ações humanas. Os fenômenos físicos tais como

ignição ou condições meteorológicas que podem afetar o resultado do evento iniciador também devem ser identificados.

4. **Definir os cenários dos acidentes.** Para cada evento iniciador, deve-se definir os vários cenários de acidente que podem acontecer. Assim devem ser definidas as interações e dependências entre os vários sistemas envolvidos, bem como seus tempos de resposta e seqüências de atuação. A AAE deve ser então construída para ilustrar estes cenários.
5. **Analisar os resultados das seqüências de acidentes.** Para cada seqüência de acidente da árvore de eventos, deve-se determinar a sua freqüência e as conseqüências que resultam da sua ocorrência.
6. **Resumir os resultados.** A Análise de Árvore de Eventos pode gerar numerosas seqüências de acidente que devem ser avaliadas na análise global. O resumo dos resultados em tabelas ou quadros facilitará a organização dos dados para análise.
7. **Usar os resultados para tomadas de decisão.** Deve-se avaliar as recomendações da análise e os benefícios que se pretende alcançar. Benefícios podem incluir segurança melhorada e desempenho ambiental, redução de custo, ou produção adicional.

3.6. Levantamento de *Softwares* Disponíveis para Avaliação de Riscos

A seguir são apresentados alguns *softwares*, comerciais e *freewares*, disponíveis para uso na análise de risco de instalações, sistemas e componentes.

- **ADORA (*Atmospheric Dispersion of Reacting Agentes*)** [76]

Tipo do *software*: Comercial

Fornecedor: BlazeTech Corporation

Descrição: O ADORA foi projetado para modelar, principalmente, dois cenários de liberação instantâneas de substâncias químicas tóxicas que podem reagir entre elas mesmas ou com o meio ambiente, tais como:

- 1) explosões que resultam em reações com altas temperatura e bola de fogo e
- 2) derramamentos que incluem difusão de gás denso reações de baixa temperatura com a umidade do ar e a possibilidade de elevação de nuvem.

O modelo adotado pelo ADORA faz a ligação entre a caracterização da fonte de reação e o cálculo da dispersão em atmosfera turbulenta.

- **BLEVE Incident Simulator - BIS [77]**

Tipo do *software*: Comercial

Fornecedor: ThermDyne Technologies Ltda.

Descrição: O BLEVE ou expansão de vapor líquido fervente (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*), é o pior acidente possível de acontecer quando um tanque com gás liqüefeito sob pressão, como propano ou GLP, é envolvido em acidente devido a contato com fogo ou impacto.

O BLEVE Simulador Incident - BIS é um *software* de cálculo interativo que permite estudar as consequências com tanques de diferente tamanhos, tipos de fogo e proteção dos tanques. Entre as possibilidades de análise inclui-se explosão, projéteis, bola de fogo e explosões de nuvem de vapor. O *software* também inclui um banco de dados de informação inclusive imagens gráficas.

- **CARA-FaultTree [3]**

Tipo do *software*: Comercial

Fornecedor: DNV - Det Norske Veritas Risk Management

Descrição: O CARA-FaultTree é um *software* que permite modelar sistemas incorporar confiabilidade desde o início de um projeto, além de identificar falhas potenciais de equipamento antes que elas ocorram.

O CARA-FaultTree é uma ferramenta analítica que possibilita uma avaliação de confiabilidade.

- **CHARM®** [3, 78]

Tipo do *software*: Comercial

Fornecedor: Radian International LLC

Descrição: CHARM® é um *software* que apresenta um modelo complexo que permite calcular e prever a movimentação e concentração de produtos químicos liberados, em nuvens aerotransportadas, radiação térmica proveniente de BLEVEs, incêndio em poças, jato de fogo, sobrepressão de explosões de nuvem de vapor e falha em vasos.

- **DNV-Pro** [3]

Tipo do *software*: Comercial

Fornecedor: DNV - Det Norske Veritas Risk Management

Descrição: O DNV-Pro é um pacote para análise de risco com as técnicas HazOp, *What-If/Checklist* e AMFE.

- **FaultREASE** [2]

Tipo do *software*: Comercial

Fornecedor: Arthur D. Little, Inc.

Descrição: FaultREASE é um *software* para criar, editar e avaliar árvores de falhas. Este *software* permite mover símbolos ao redor da árvore, e faz o rearranjo automaticamente. Podem ser movidas também ramificações inteiras. O FaultREASE disponibiliza seus gráficos permitindo uma análise da lógica e avaliação quantitativa a matemática da árvore de falhas, relacionando cálculos de probabilidade/frequência e cortes do sistema. Para árvores com eventos repetidos, é feita uma redução usando avaliação direta. Este método permite uma maior rapidez e precisão que a redução booleana da árvore de falhas.

- **RMP99 Assistant [2]**

Tipo do *software*: Comercial

Fornecedor: Computerra, Inc.

Descrição: RMP99 Assistant é um *software* projetado para ajudar no desenvolvimento de Plano de Gerenciamento de Risco. O RMP99 Assistant inclui, entre as suas características, ajuda nos cálculos de *endpoint* tóxicos, análise de consequência externa à instalação, definição dos cenários de liberação e processo de análises de risco. O RMP99 Assistant verifica as quantidades de liberação frente ao inventário do processo e da instalação, e considera os tubos conectados e outros componentes de processo para determinação das quantidades de liberadas.

O conceito de “*endpoint*” tóxico é uma terminologia da “Environment Protection Agency (EPA)” para Programas de Gerenciamento de Risco, de acordo com o 40 CFR 68, que é utilizado para medir o efeito de liberações acidentais de materiais tóxicos para o público.

“*Endpoint*” tóxico é definido como sendo a distância que a nuvem tóxica deverá viajar antes de se dissipar, de tal forma que não ocorra, a partir daí, nenhum dano sério à saúde, oriundo de uma exposição de curta duração [35].

- **RMP*Comp [35]**

Tipo do *software*: Freeware

Fornecedor: disponibilizado pela EPA-*Environmental Protection Agency*

Descrição: RMP*Comp é uma ferramenta de planejamento, desenvolvida para determinar riscos de alta prioridade em instalações que lidam com produtos químicos perigosos. Incorpora, internamente, tabelas de *endpoints* tóxicos específicas para diversos gases e modelos de dispersão atmosférica simplificados, não permitindo que sejam

alterados pelo usuário, por exemplo, velocidades de vento e classes de estabilidade.

- **PHASTProfessional [79]**

Tipo do *software*: Comercial

Fornecedor: Det Norske Veritas Risk Management

Descrição: PHASTProfessional é um *software* de técnicas quantitativas que permite examinar o progresso de um incidente potencial desde o início da liberação de produtos químicos perigosos, através da formação de uma nuvem ou poças, até a dispersão final, calculando *endpoints* para concentração, radiação térmica, toxicidade e sobrepressão devido a explosão. Este *software* é aplicável a todas as fases de projeto e operação de uma extensa gama de indústrias.

Este software permite ainda sobrepor resultados de consequência em mapas, fotografias de satélite e leiaute de instalações para uso em desenvolvimento de projetos, em elaboração de planejamento de resposta a emergências, etc.

- **SAFETIPProfessional [3]**

Tipo do *software*: Comercial

Fornecedor: DNV - Det Norske Veritas Risk Management

Descrição: O SAFETIPProfessional é usado para calcular o risco individual e o associado relacionado com a fabricação, armazenamento e transporte de substâncias químicas perigosas. Usando o modelo de cálculo de consequências do PHAST, o SAFETI combina o desenvolvimento de cenários de acidente com a densidade populacional local, fontes de ignição, condições meteorológicas e taxa frequência de acidentes para fornecer uma dimensão do risco.

- **HAZMAN, RISKMAN, MIDAS [2]**

Tipo do *software*: Comercial

Fornecedor: PLG, Inc

Descrição: O HAZMAN é um pacote de software para ajudar no desenvolvimento de estudos de HazOp e análise preliminar de perigos (APP/PHA); o RISKMAN é um pacote para avaliação de riscos quantitativo integrado e o MIDAS é um software para avaliação de dispersão atmosférica e informações meteorológicas.

• **HGSYSTEM [80]**

Tipo do *software*: Freeware

Fornecedor: Shell International Oil Products

Descrição: O HGSYSTEM é um conjunto de *softwares* para avaliar a dispersão de vapores de gases, líquidos ou liberações bifásicas, incluindo misturas de substâncias.

O HGSYSTEM foi originariamente concebido para modelar a liberação de HF e gases ideais, e então estendido para incluir misturas. O HGSYSTEM foi desenvolvido pela Shell Research Ltda., com apoio de grupos industriais.

• **HGSYSTEMUF6 [81]**

Tipo do *software*: Comercial

Fornecedor: United States Department of Energy - Energy Science and Technology Software Center

Descrição: O HGSYSTEMUF6 é um conjunto de modelos para estimar consequências associadas a acidentes, liberações atmosféricas de UF₆ e seus produtos de reação. Este *software* é baseado no HGSYSTEM, versão 3.0, da Shell Research Ltda., e contém módulos que levam em conta o comportamento químico e termodinâmico do UF₆.

• **AFTOX [82, 83]**

Tipo do *software*: Freeware

Fornecedor: disponibilizado pela EPA-*Environmental Protection Agency*

Descrição: O AFTOX é um *software* que utiliza um modelo de dispersão para determinar as concentrações de substâncias químicas tóxicas e

permite a opção de calcular o corredor tóxico (distâncias de perigo), a concentração em um local específico, ou o local de máxima concentração. O AFTOX permite a análise da concentração, proveniente de liberações gasosas ou líquidas instantâneas ou contínuas, no solo ou acima do solo.

4. METODOLOGIA

4.1. Abordagem Utilizada para Desenvolvimento da Metodologia

As etapas para o desenvolvimento da metodologia para avaliação de riscos em instalações de processamento químico ou nuclear está ilustrada na Figura 4.1.

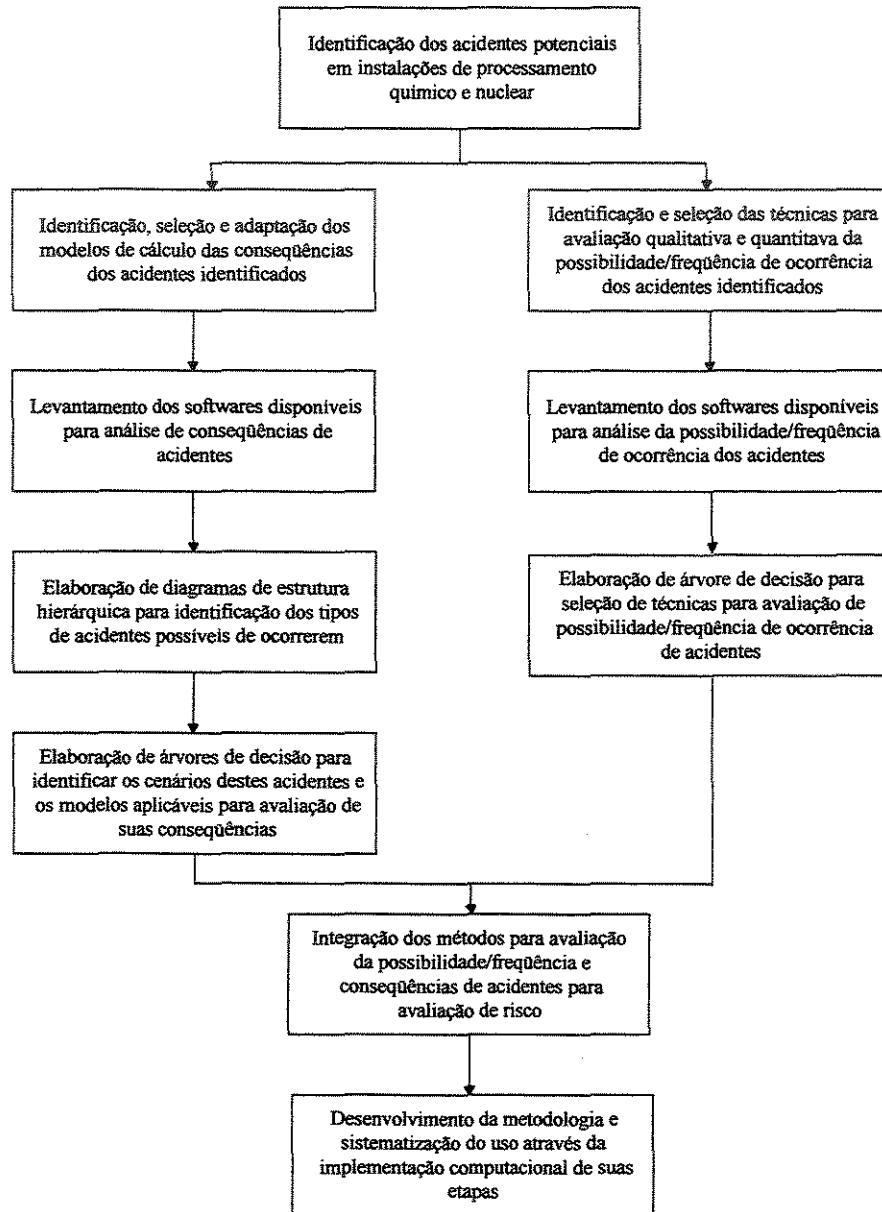


Figura 4.1 - Etapas para o desenvolvimento da metodologia para avaliação de riscos em instalações de processamento químico e nuclear

Inicialmente foram identificados os principais acidentes possíveis de ocorrerem em instalações de processamento químico e nuclear (Tabelas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6). Em seguida foram identificadas e selecionados modelos para avaliação de consequências de cada um dos acidentes identificados (item 3.4) e técnicas qualitativas e quantitativas disponíveis para a identificação de riscos (item 3.5). Foram necessárias adaptações de modelos de cálculo para adequação à metodologia desenvolvida.

Efetuuou-se, também, um levantamento dos *softwares* disponíveis tanto para análise da possibilidade/frequência de ocorrência destes acidentes quanto para análise de suas consequências.

Foram elaborados diagramas de estrutura hierárquica para identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem no tipo de instalação em estudo, bem como árvores de decisão que permitem identificar os cenários destes acidentes e os modelos aplicáveis para avaliação de suas consequências.

Foi elaborada, também, uma árvore de decisão para seleção de técnicas para avaliação de possibilidade/frequência de ocorrência de acidentes.

Para orientar a integração dos métodos para avaliação de riscos foi elaborada uma planilha e estabeleceu-se limites para classificação de consequências, de frequência de acidentes e de velocidade de detecção e definiu-se uma matriz para classificação dos riscos.

A sistematização da metodologia foi realizada através da implementação de um *software* ao qual deu-se o nome de “Metodologia para Avaliação de Riscos – MAR”, desenvolvido em DELPHI, versão 5.0, e que pode ser executado em ambiente Windows 98, ou superior, em computadores Pentium, ou superior.

4.2. Metodologia Desenvolvida

A metodologia desenvolvida para avaliação de riscos envolve um procedimento sistemático para a estimativa da frequência, das consequências do evento que está sendo considerado e da sua velocidade de detecção, com vistas à sua classificação e priorização diante dos demais riscos existentes.

A avaliação de riscos é orientada pelo preenchimento da planilha mostrada na Tabela 4.1. Esta planilha foi desenvolvida tomando como base conceitos de APP, AMFE

[1, 5, 6, 73, 74] e metodologias para identificação de risco sugeridas pela United Nations Environment Programme – Industry and Environment [84].

Para preenchimento da *Coluna 1 - Instalação, Área ou Sistema*, deve ser respondida a seguinte questão: Será avaliado o risco de qual instalação, área ou sistema? Deve-se iniciar pelos riscos mais comuns e que são considerados significativos de acordo com as informações disponíveis.

Para preenchimento da *Coluna 2 - Descrição das Operações*, deve ser respondida a seguinte questão: Quais operações são realizadas na instalação, área ou sistema? Nesta coluna devem ser relacionadas as operações genéricas que serão objeto de avaliação de riscos, tais como, fabricação, purificação, armazenamento, transporte, manutenção, reparo, produção e serviços.

Para preenchimento da *Coluna 3 – Situação de Risco*, deve ser respondida a seguinte questão: Quais situações de risco estão envolvidas nas operações listadas na Coluna 2? Nesta coluna devem ser listadas as substâncias ou formas de energia responsáveis pelo risco de acidentes. Devem ser listadas as quantidades envolvidas e demais informações pertinentes para uma estimativa dos riscos envolvidos como, por exemplo, condições de armazenamento e limite de toxicidade de um gás tóxico.

Na *Coluna 4 – Cenário do Acidente*, para preenchimento da *Coluna 4EI - Evento Iniciador* deve ser respondida a seguinte questão: Quais eventos iniciadores de acidentes podem ocorrer com as situações de riscos listadas na Coluna 3? Nesta coluna devem ser listados eventos tais como, vazamentos de gases e líquidos, moderação ou perda de geometria segura de materiais nucleares, liberação de particulados na atmosfera, etc. Na Figura 4.2 são apresentados os diagramas de estrutura hierárquica (a) e (b) elaborados para auxiliar na identificação dos eventos típicos em instalações de processamento químico e nuclear. Para preenchimento da *Coluna 4CE - Causa do Evento Iniciador* deve ser respondida a seguinte questão: Quais são as possíveis causas que podem levar aos eventos identificados? A resposta a esta questão pode ser encontrada através de dados históricos, operacionais ou, ainda, através da aplicação de técnicas como Análise de Árvore de Falhas (AAF) ou Diagrama de Causa e Efeito. Nesta coluna devem ser listadas causas tais como, ruptura de tubulação, ruptura de vasos, inundações, rompimento de cilindros, etc. Para preenchimento da *Coluna 4TA - Tipo do Acidente* deve ser respondida a seguinte

questão: Que tipo de acidente pode ser provocado pelo evento perigoso identificado na Coluna 4EI? Nesta coluna devem ser listados acidentes tais como, incêndios em poça, explosões de nuvem de vapor, criticalidade nuclear, etc. Nas Figuras 4.3 a 4.19 são mostradas as árvores de decisão elaboradas para auxiliar na identificação do tipo de acidente em função dos eventos considerados.

Para preenchimento da **Coluna 5 – Pessoas sob Ameaça**, deve ser respondida a seguinte questão: Quais trabalhadores ou indivíduos do público em geral, estão sob ameaça pelos riscos identificados e o quanto eles são vulneráveis? Se os perigos não são significativos, a instalação, área ou sistema deve ser eliminada da coluna 1.

Para preenchimento da **Coluna 6 - Avaliação das Conseqüências**, devem ser respondidas a seguintes questões: Como podem ser afetados os trabalhadores ou indivíduos do público em geral? Quais são as conseqüências? A que distância? Podem ser necessários modelos algébricos ou computacionais para realizar estas estimativas. As árvores de decisão mostradas nas Figuras 4.3 a 4.19 também auxiliam na seleção do modelo adequado para avaliação das conseqüências de cada tipo de acidente, os quais são apresentados no Capítulo 3, já com as adaptações necessárias aos tipos de acidentes considerados.

Para preenchimento da **Colunas 7 - Classificação das Conseqüências**, devem ser respondidas as seguintes questões: Quais as conseqüências para a saúde e vida dos trabalhadores e do público em geral? (**Coluna 7P – Conseqüências Para as Pessoas sob Ameaça**, valores de 1 a 5, Tabela 4.2). A velocidade de detecção do acidente permite que o acidente seja detectado antes que sejam alcançadas as conseqüências previstas e as pessoas sob ameaça sejam removidas? (**Coluna 7V – Velocidade de Detecção**, valores de 1 a 3, Tabela 4.3). Devem ser considerados, não só a natureza do acidente, com os controles existentes.

Para preenchimento da **Coluna 8 - Frequência**, as seguintes questões devem ser respondida: Quais as frequências de ocorrência dos eventos? Como podem ocorrer? Que experiência operacional existe? Para atribuir valores de 1 a 5 da Tabela 4.4 (avaliação quantitativa) ou da Tabela 4.5 (avaliação qualitativa) podem ser necessárias estimativas utilizando-se as técnicas descritas no item 3.5 deste trabalho. Na Figura 4.20 é apresentada uma árvore de decisão para auxiliar nesta análise.

Para preenchimento da *Coluna 9 - Importância*, a seguinte questão deve ser respondida: Qual a importância da instalação, área ou sistema em termos de risco? Os níveis de risco mostrados na Tabela 4.6 formam a base para decidir se serão necessárias adoções de medidas de controle. Esta Tabela mostra, também, que o esforço de controle e a urgência da ação devem ser proporcionais ao risco. A importância depende da frequência e da consequência, e pode ser representada em uma matriz de risco como a sugerida na Figura 4.21. Quando houverem riscos de mesmo nível, porém com classe de detecção diferentes, deve-se priorizar as ações de controle aos riscos com classe de detecção mais altas.

A *Coluna 10 - Comentários*, é reservada para anotações. Na Tabela 4.6 são apresentados alguns comentários genéricos que podem auxiliar no preenchimento desta coluna.

Os resultados da avaliação de riscos, além da valiosa informação para priorizar a utilização dos recursos disponíveis visando a redução do risco, podem ser utilizados para o estabelecimento de procedimentos operacionais e uma implementação detalhada do plano e dos procedimentos de emergência para a instalação.

A utilização da metodologia pode ser feita ou diretamente, através do preenchimento da Tabela 4.1 e utilização dos diagramas, tabelas, árvores de decisão e equações associadas, ou com o auxílio do *software* MAR descrito no ANEXO II.

Tabela 4.1 - Planilha simplificada para orientação da aplicação da metodologia proposta para avaliação de riscos (baseada em [1, 5, 6, 73, 74, 84]).

Instalação, Área ou Sistema 1	Descrição das Operações 2	Situação de Risco 3	Cenário do Acidente 4			Pessoas sob Ameaça 5	Avaliação das Consequências 6	Classificação das Consequências 7		Freq 8	Imp 9	Comentários 10
			EI	CE	TA			P	V			

EI = Evento Iniciador CE = Causa do Evento Iniciador TA = Tipo do Acidente P = Consequências para as Pessoas sob Ameaça V = Velocidade de Detecção
Freq = Frequência Imp = Importância

Tabela 4.2 - Consequências para as Pessoas sob Ameaça (coluna 7P) (baseada em [74, 84]).

Classe	Características
A - Pouco importante	Pequeno desconforto passageiro.
B - Limitada	Alguns ferimentos ou desconfortos de longa duração.
C - Grave	1 a 4 mortos ou 1 a 19 pessoas com ferimentos graves.
D - Muito grave	5 a 20 mortos, 20 a 100 pessoas com ferimentos graves ou até 500 pessoas removidas.
E - Catastrófica	Mais de 20 mortes, centenas de feridos graves ou mais de 500 pessoas removidas.

Tabela 4.3 - Velocidade de Detecção (coluna 7V) (baseada em [84, 85]).

Classe	Características
1 - Rápida	A detecção das causas do acidente possibilita a remoção de todas as pessoas sob ameaças.
2 - Lenta	A detecção das causas do acidente possibilita a iniciativa de remoção das pessoas sob ameaça, porém não é suficiente para se efetuar a remoção de todas as pessoas sob ameaça.
3 - Sem detecção	Não há detecção das causas do acidente, impossibilitando a iniciativa de remoção das pessoas sob ameaça.

Tabela 4.4 - Frequência (coluna 8) (baseada em [74, 84]).

Classe	Características (faixa de frequência, f , por ano)
1 – Extremamente remota	$f \leq 10^{-4}$
2 - Remota	$10^{-4} < f \leq 10^{-3}$
3 - Improvável	$10^{-3} < f \leq 10^{-2}$
4 - Provável	$10^{-2} < f \leq 10^{-1}$
5 - Frequente	$f > 10^{-1}$

Tabela 4.5 - Frequência (coluna 8) (baseada em [74, 84]).

Classe	Características
1 – Extremamente remota	Conceitualmente possível, mas extremamente improvável de ocorrer durante a vida útil da instalação.
2 - Remota	Não esperado ocorrer durante a vida útil da instalação.
3 - Improvável	Pouco provável de ocorrer durante a vida útil da instalação.
4 - Provável	Esperado ocorrer até uma vez durante a vida útil da instalação.
5 - Frequente	Esperado ocorrer várias vezes durante a vida útil da instalação.

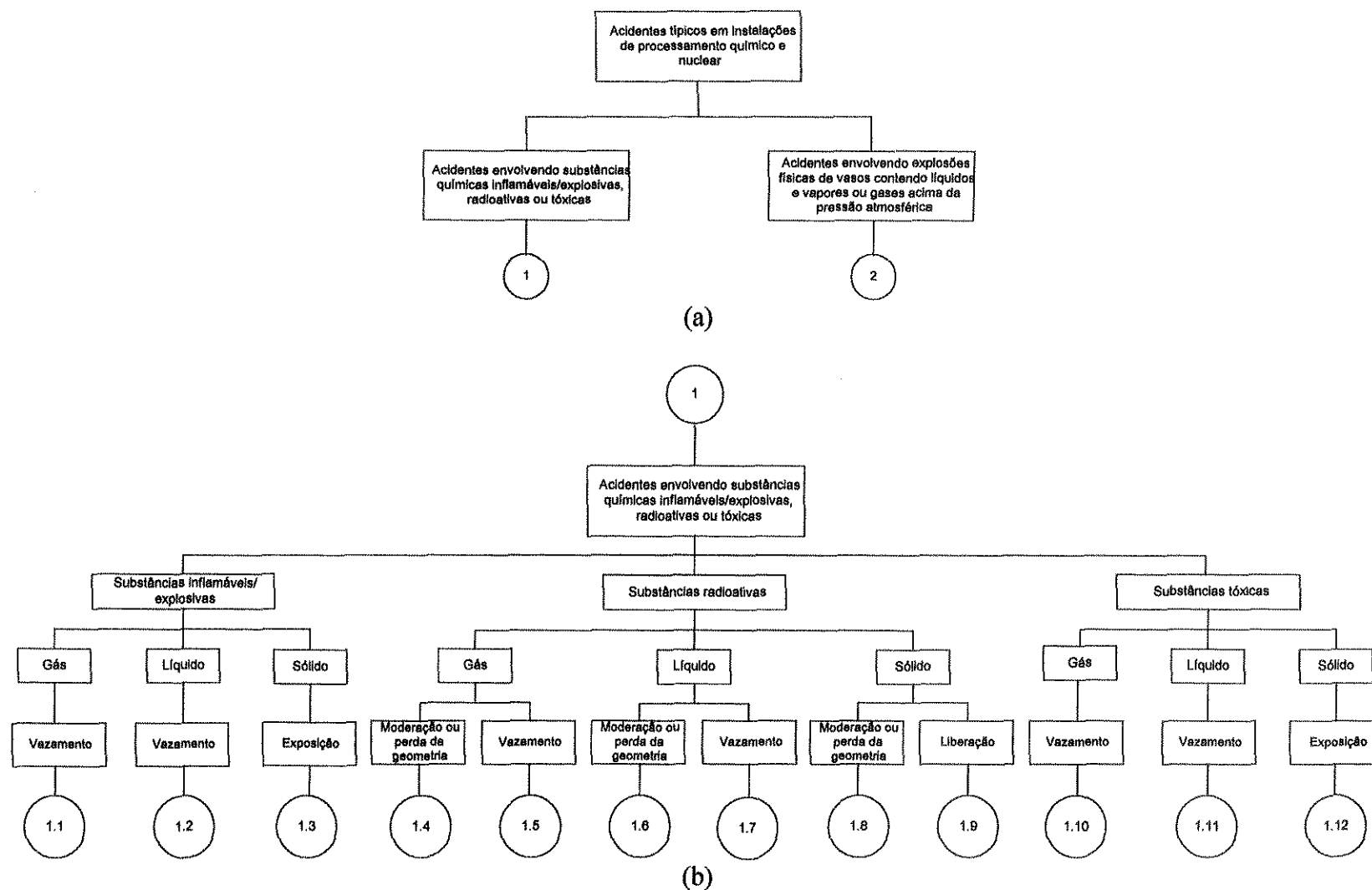


Figura 4.2 - Diagramas de estrutura hierárquica (a) e (b) para identificação de eventos acidentais típicos em instalações de processamento químico e nuclear.

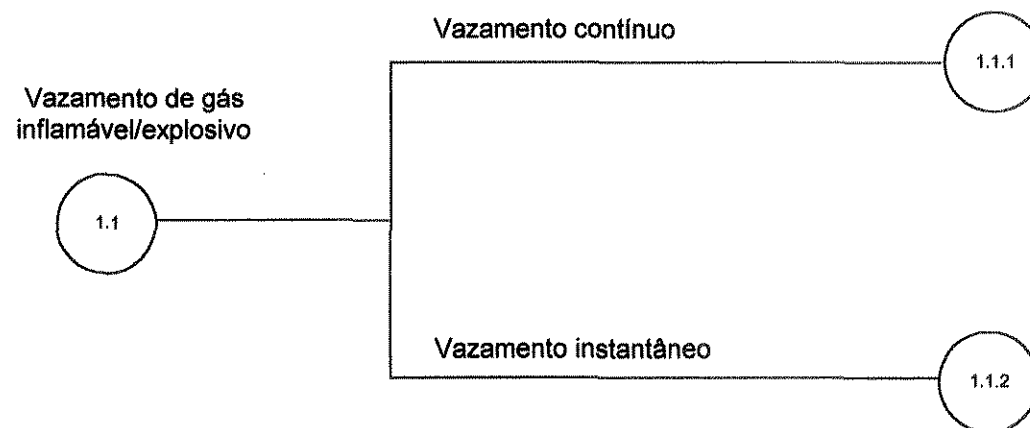
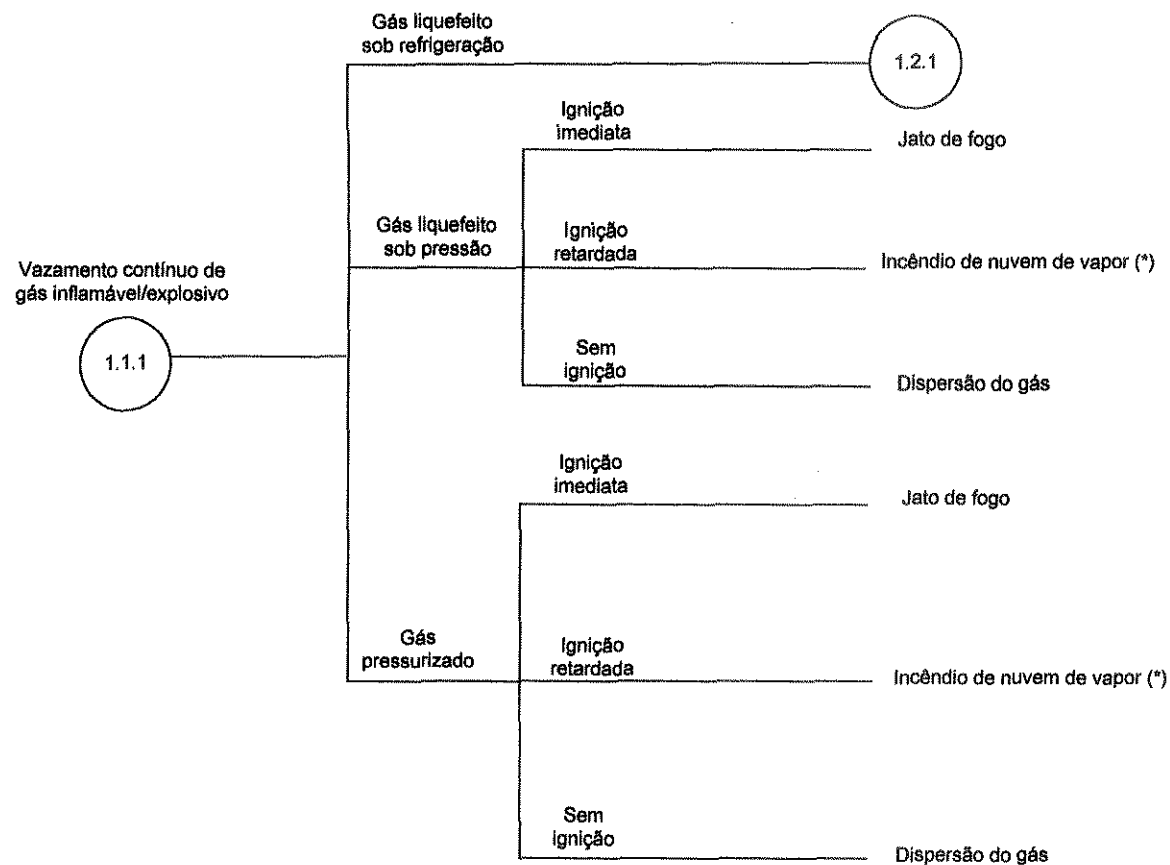
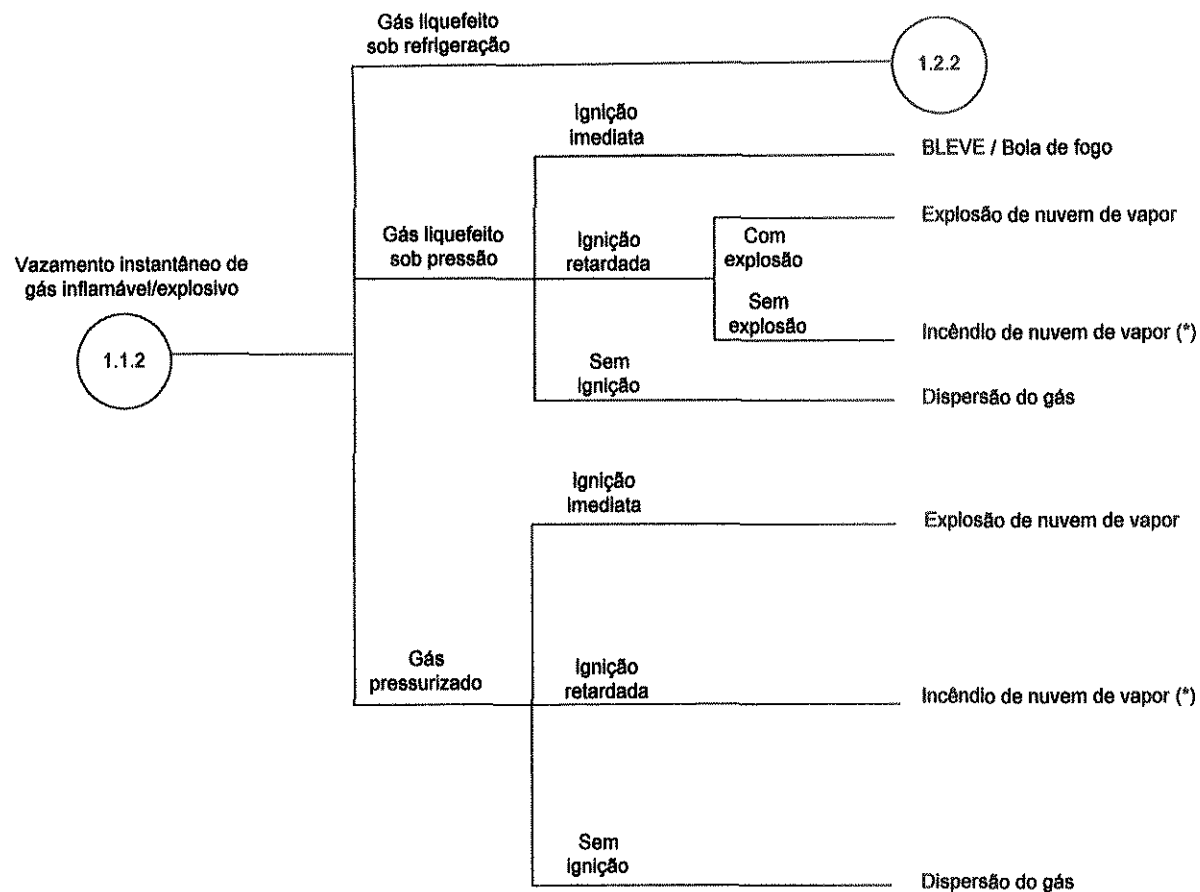


Figura 4.3 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento de gás inflamável/explosivo.



(*) não encontrado modelo de cálculo adequado na literatura

Figura 4.4 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento contínuo de gás inflamável/explosivo.



(*) não encontrado modelo de cálculo adequado na literatura

Figura 4.5 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento instantâneo de gás inflamável/explosivo.

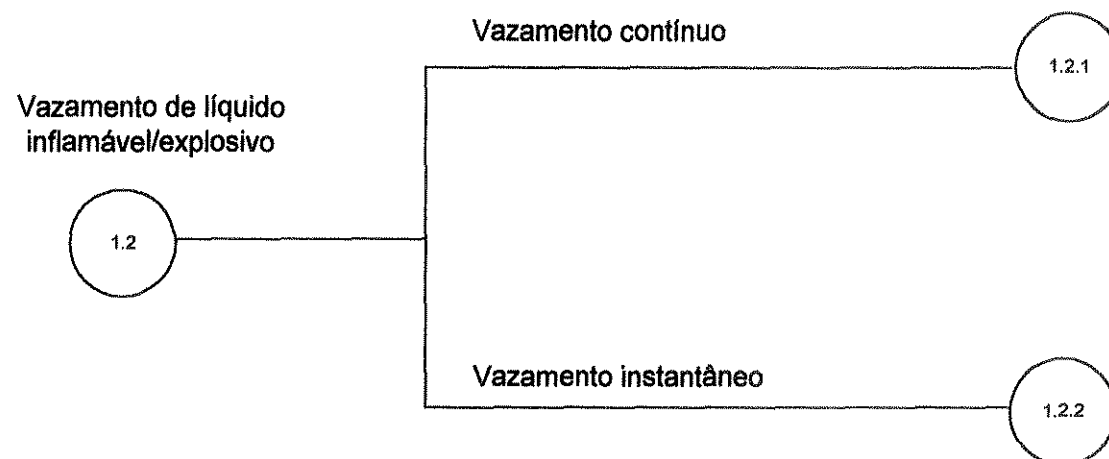


Figura 4.6 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento de líquido inflamável/explosivo.

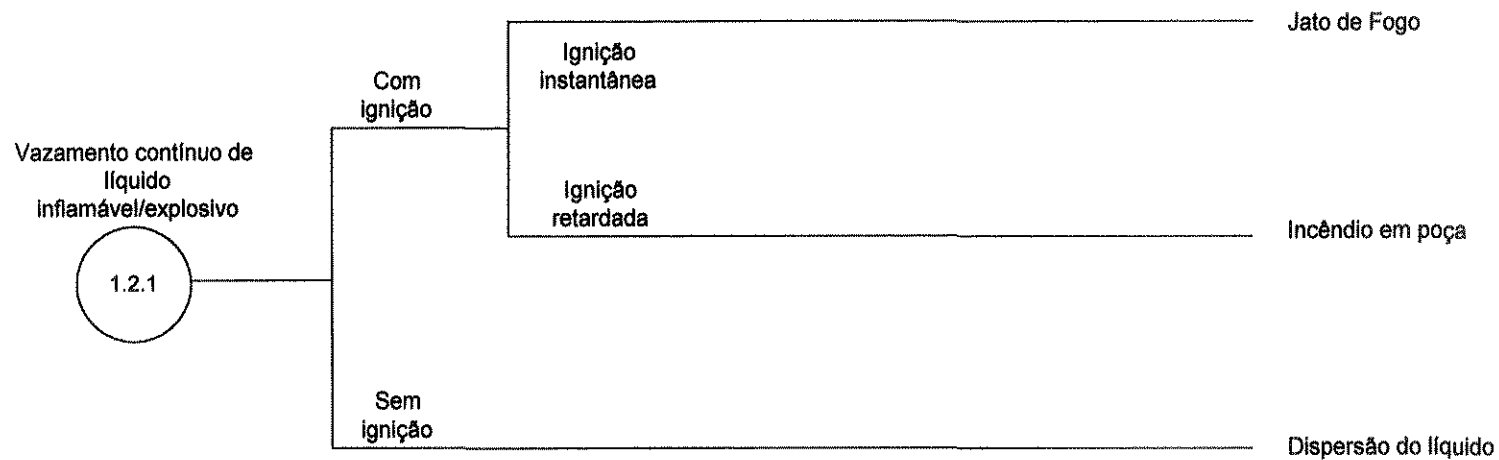


Figura 4.7 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento contínuo de líquido inflamável/explosivo.

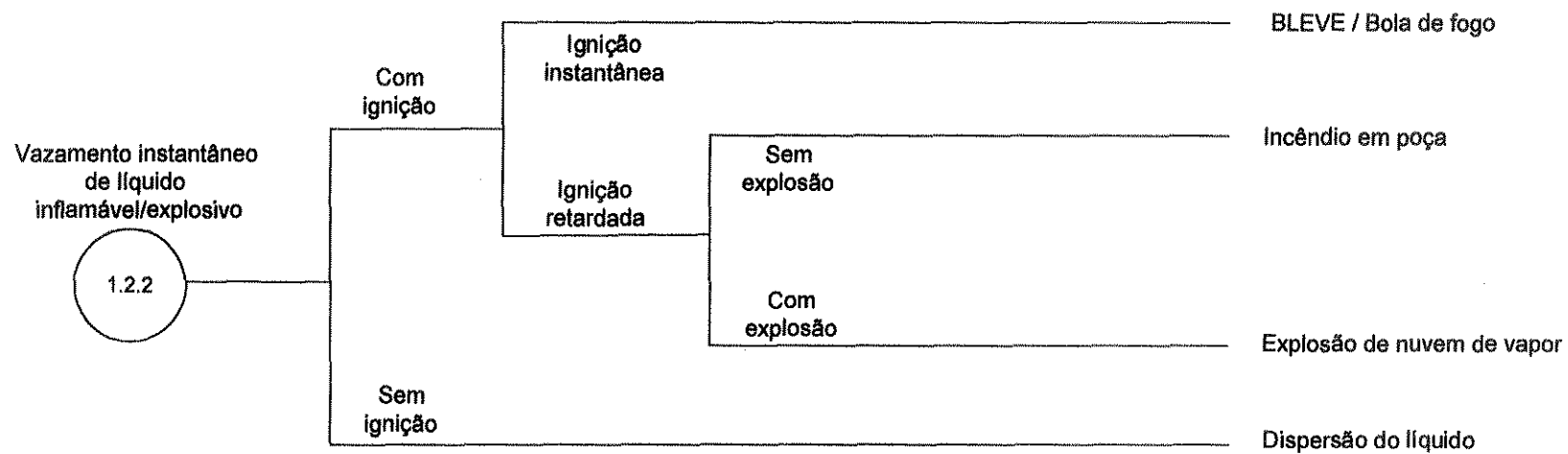
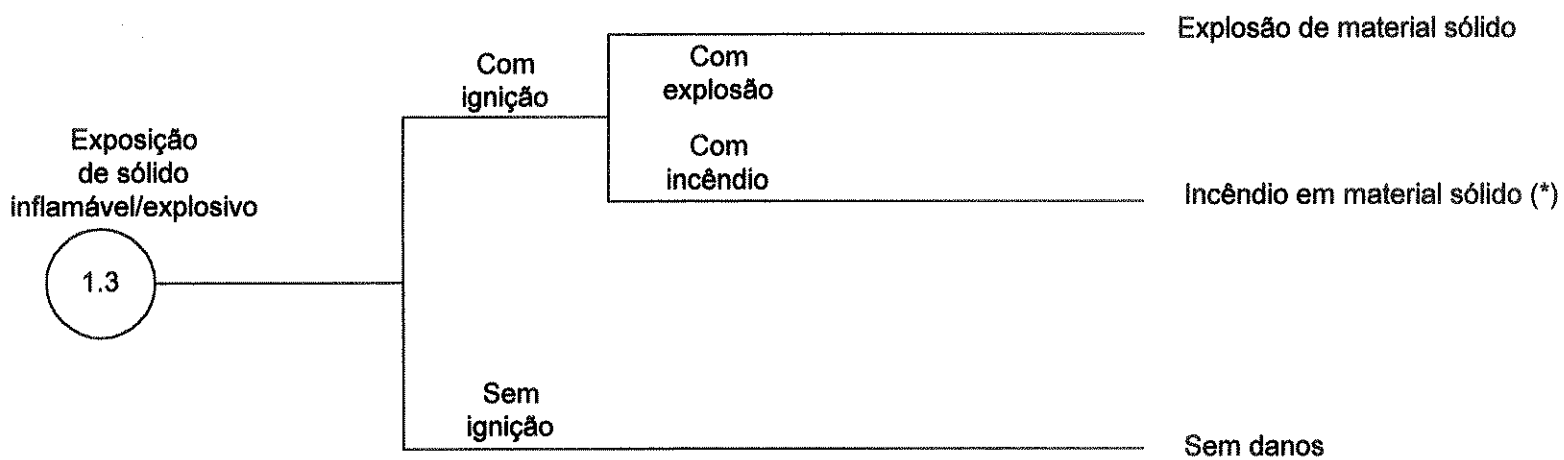
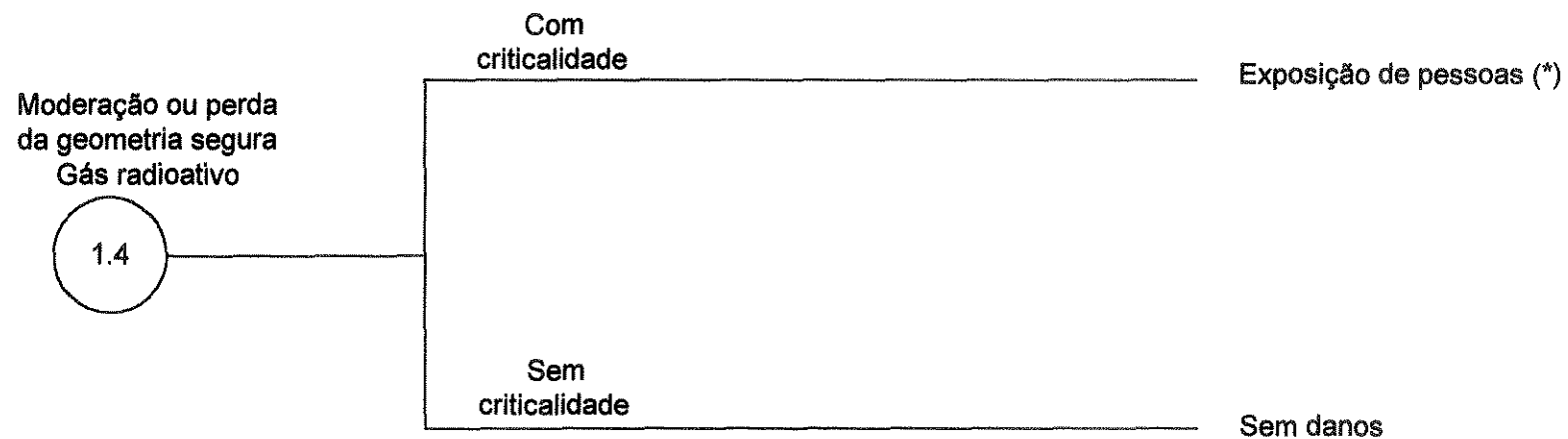


Figura 4.8 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento instantâneo de líquido inflamável/explosivo.



(*) modelo de cálculo não encontrado na literatura

Figura 4.9 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de exposição de sólido inflamável/explosivo.



(*) não encontrado na literatura modelos para cálculo de criticalidade envolvendo gás radioativo

Figura 4.10 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de moderação ou perda de geometria segura de gás radioativo.

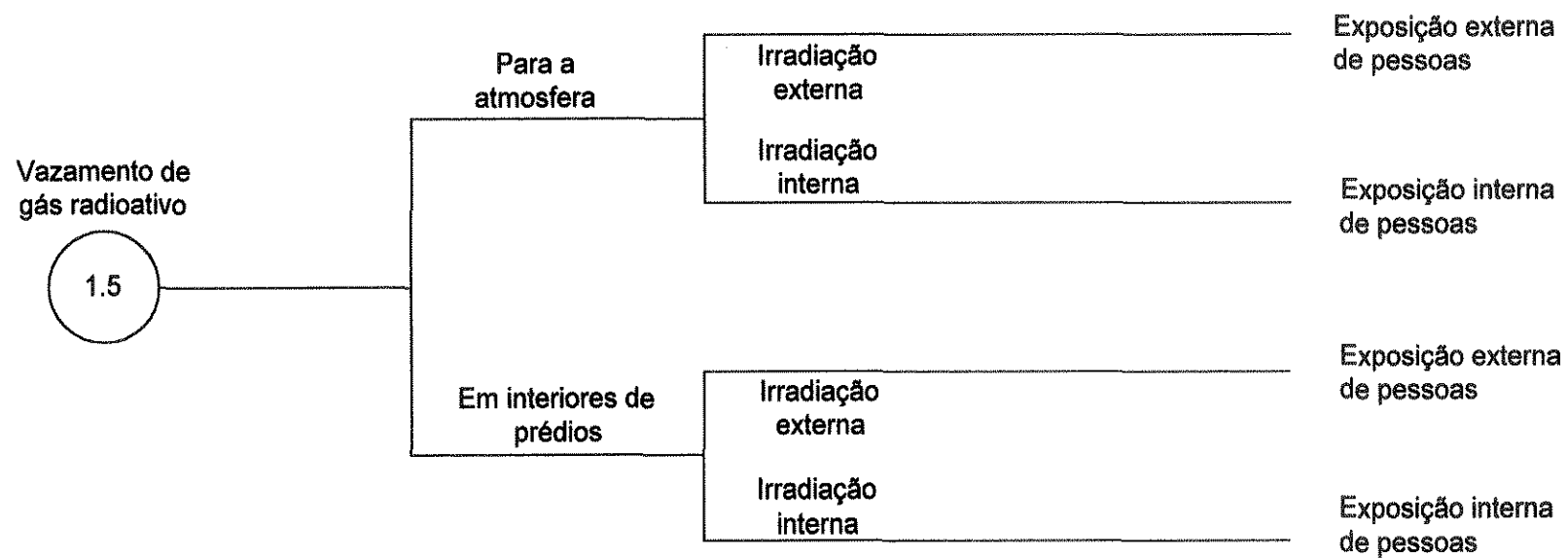


Figura 4.11 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento de gás radioativo.

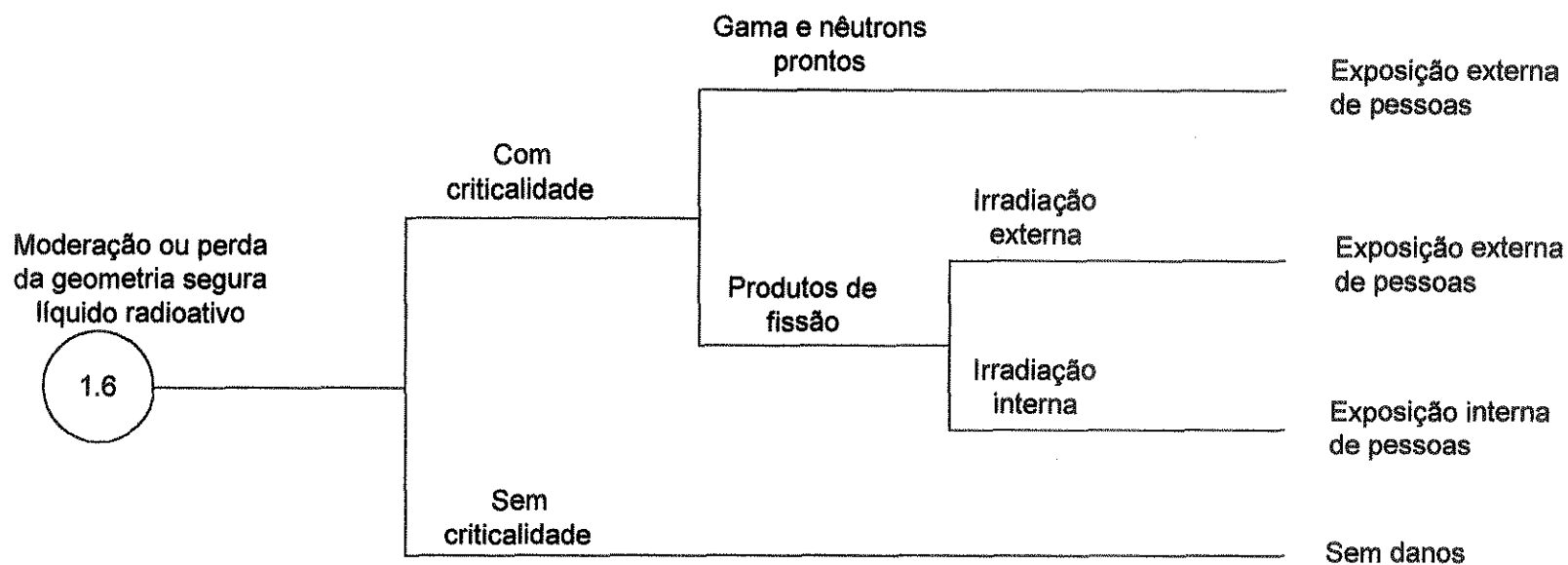


Figura 4.12 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de moderação ou perda de geometria segura de líquido radioativo.

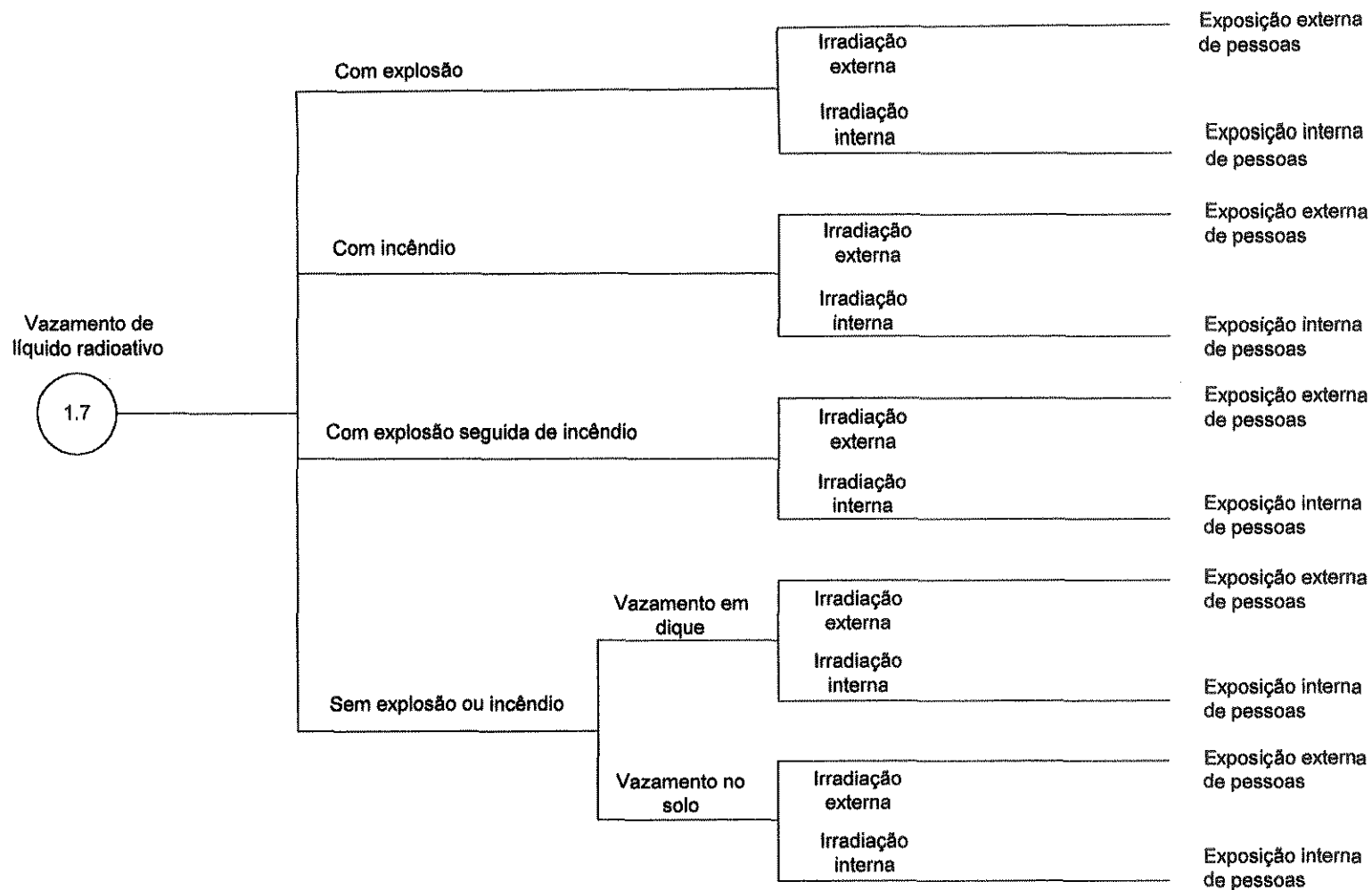


Figura 4.13 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento de líquido radioativo

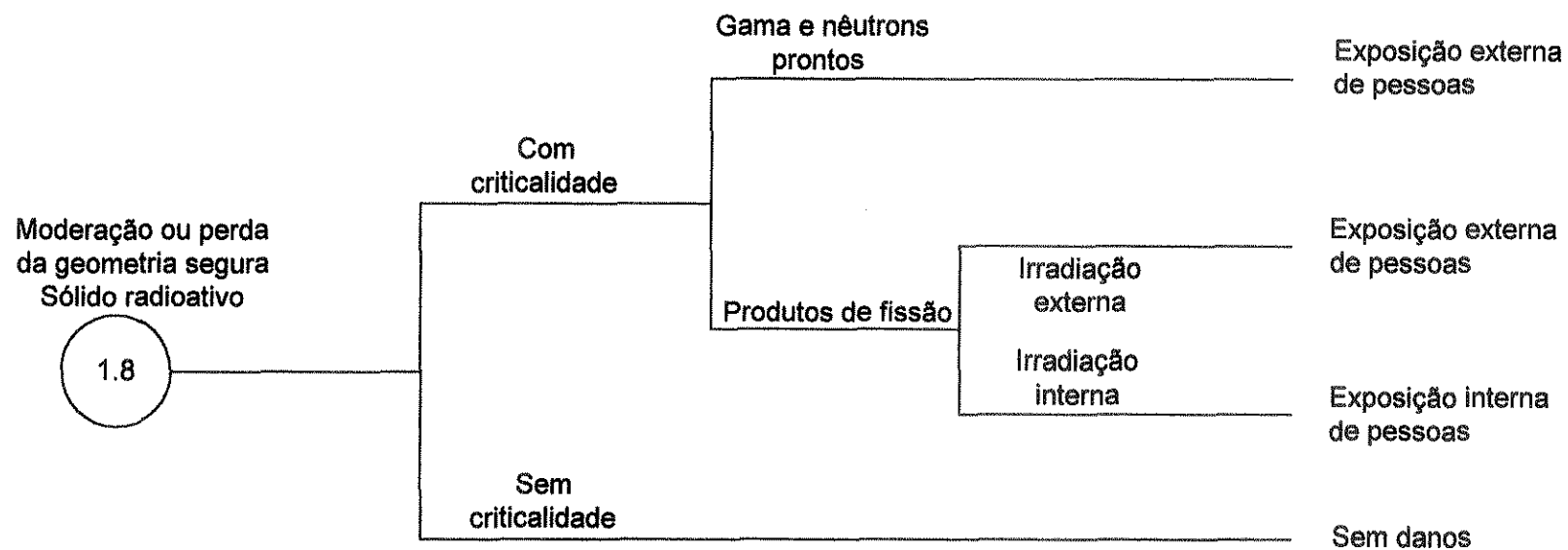


Figura 4.14 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de moderação ou perda de geometria segura de sólido radioativo

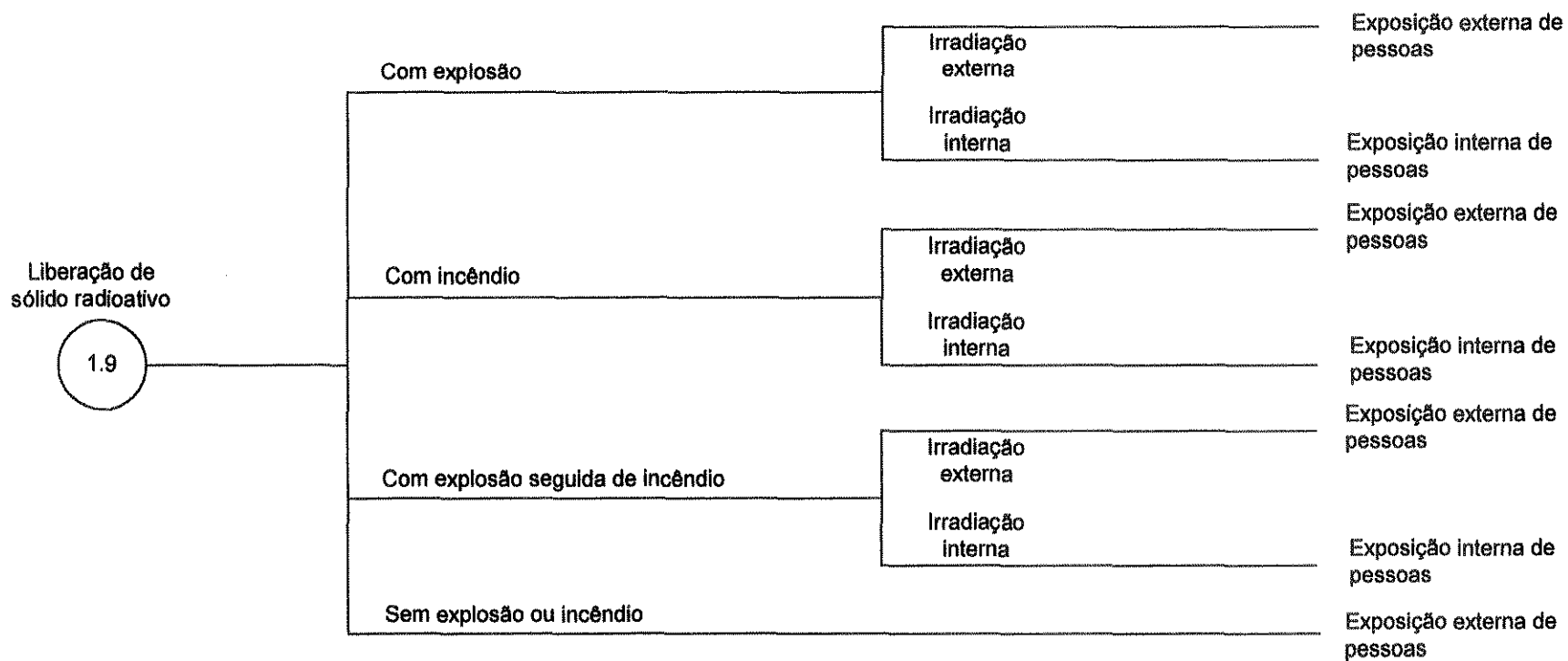


Figura 4.15 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de liberação de sólido radioativo

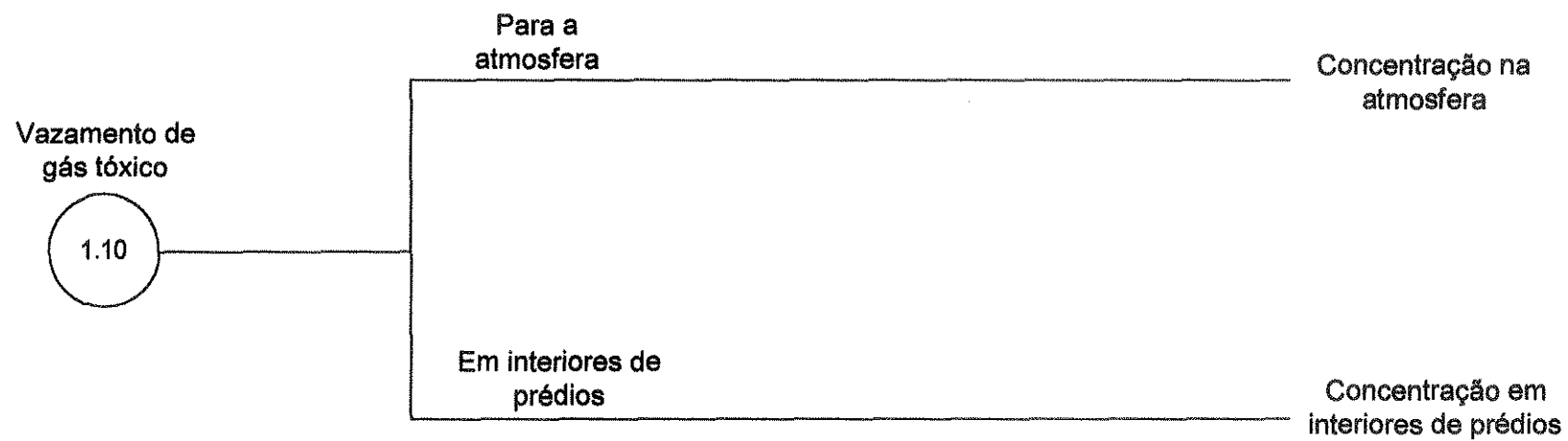


Figura 4.16 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento de gás tóxico

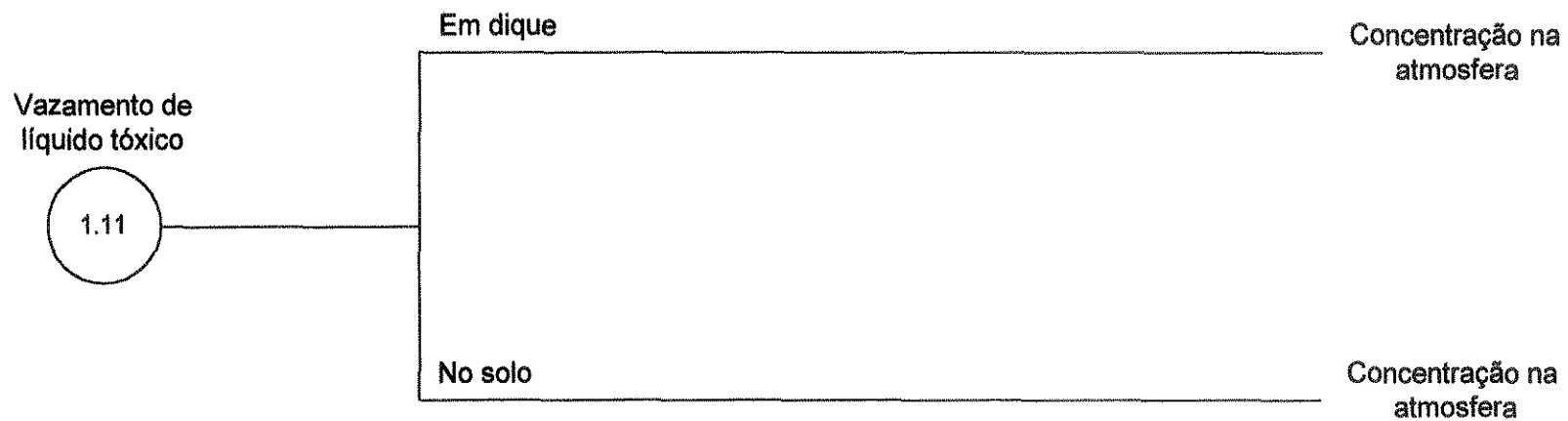
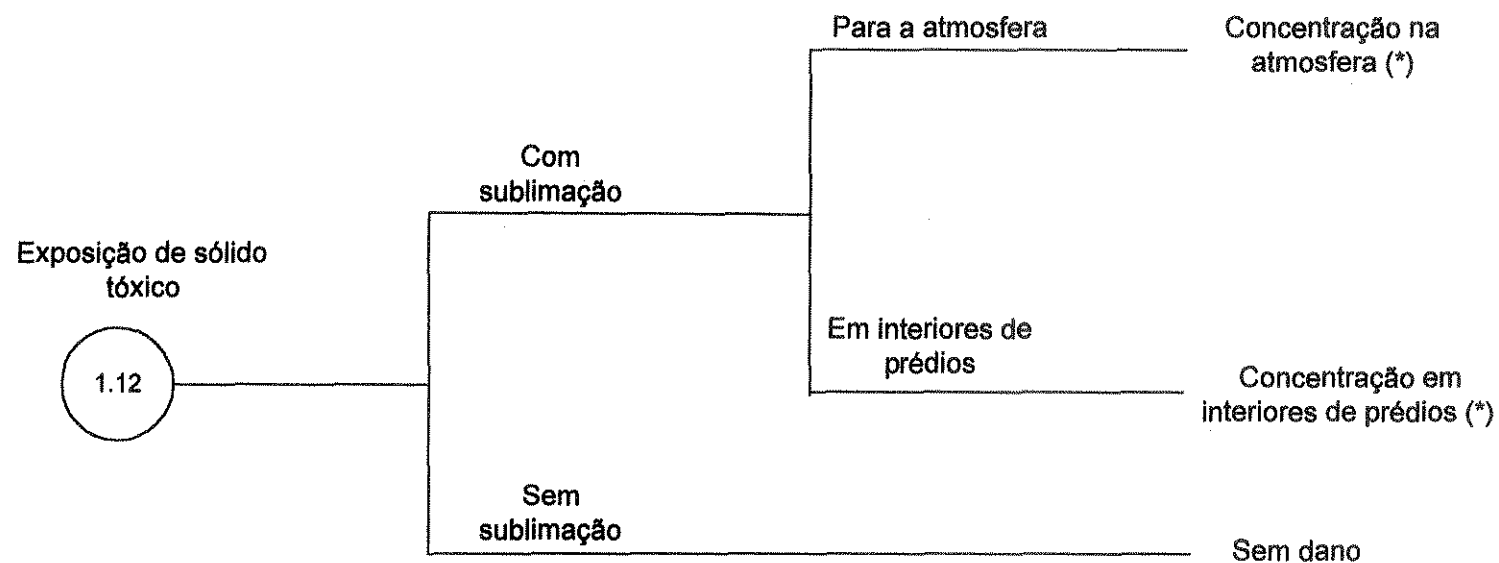


Figura 4.17 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de vazamento de líquido tóxico



(*) modelo de cálculo não encontrado na literatura

Figura 4.18 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em consequência de exposição de sólido tóxico

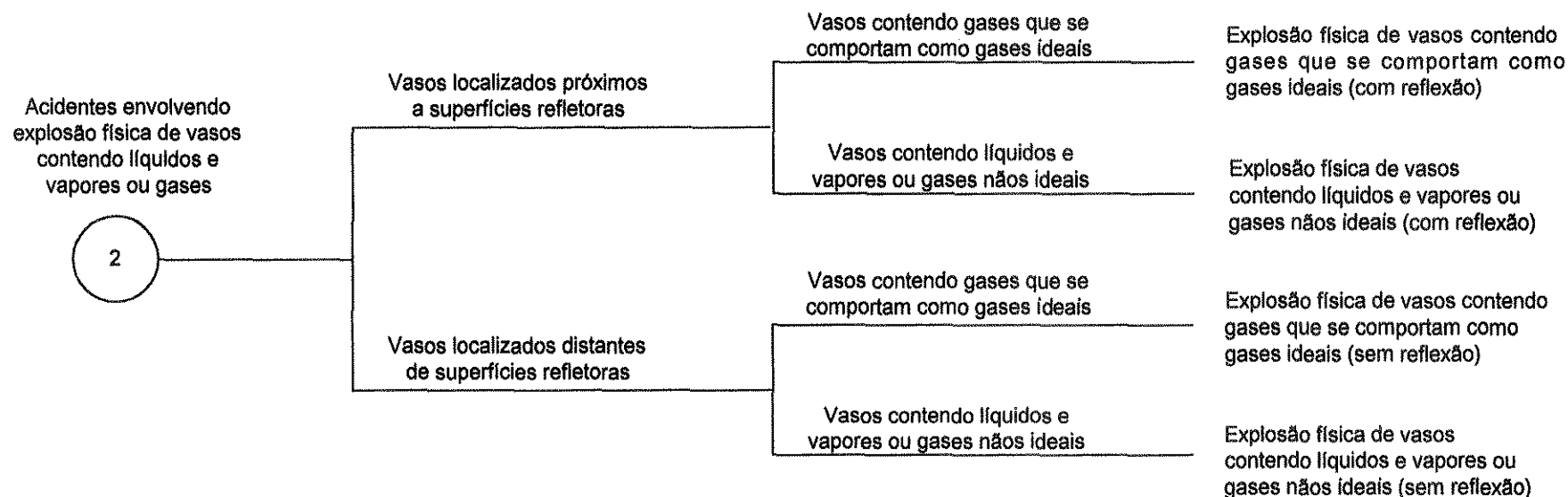


Figura 4.19 - Árvore de decisão para auxiliar na identificação dos tipos de acidentes possíveis de ocorrerem em explosão física de vasos contendo líquidos e vapores ou gases

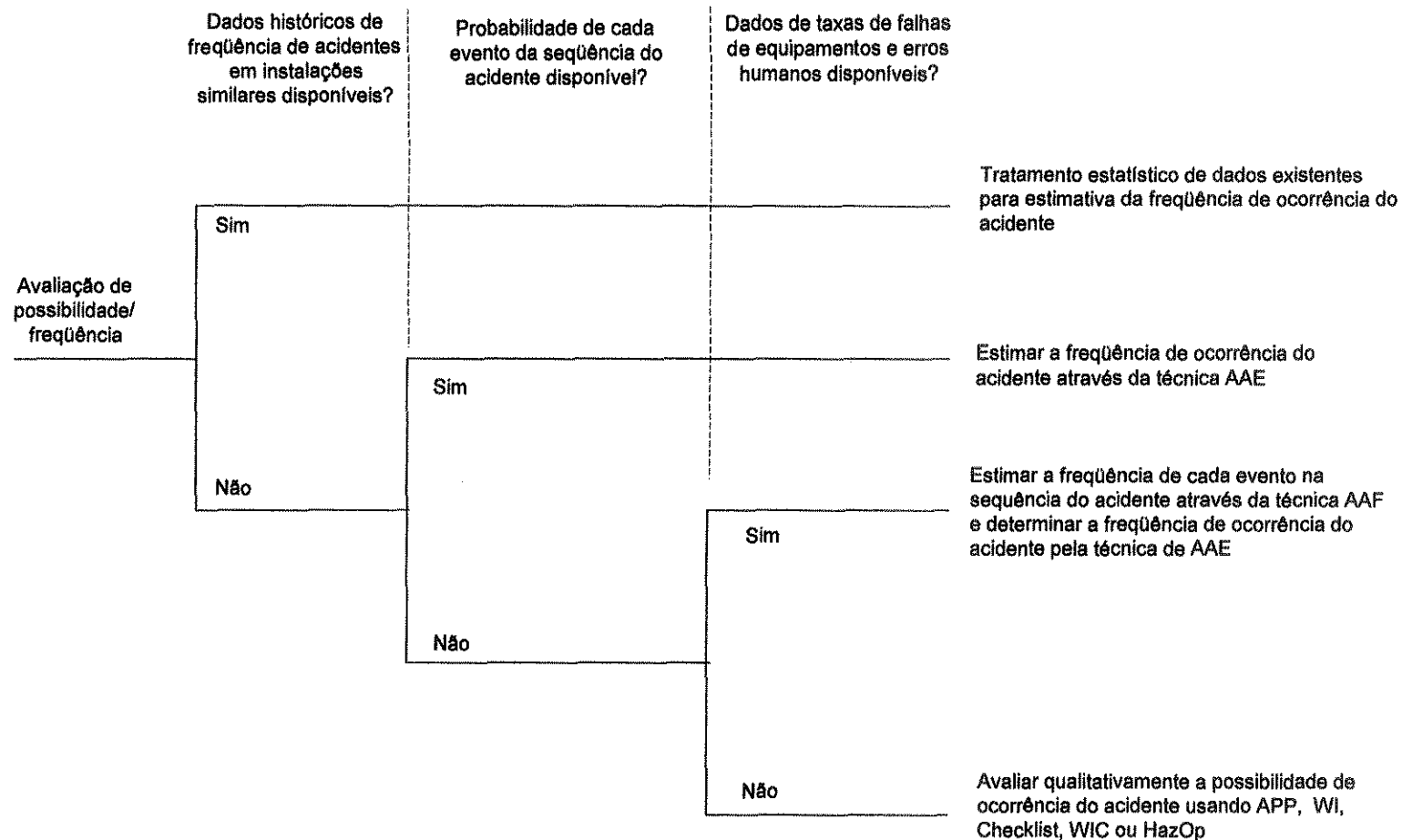


Figura 4.20 - Árvore de decisão para auxiliar a seleção de técnicas para a análise qualitativa ou quantitativa da possibilidade/freqüência de ocorrência de um acidente

Tabela 4.6 - Classificação do risco quanto à importância (coluna 9) (baseada em [84, 86])

Classe	Nível de Risco	Comentários
I	Trivial	Nenhuma ação é requerida para redução do risco e nenhum registro documental precisa ser mantido.
II	Tolerável	Nenhum controle adicional é necessário. Pode-se considerar uma solução mais econômica ou aperfeiçoamento para redução de riscos que não imponha custos extras. A monitoração é necessária para assegurar que os controles sejam mantidos.
III	Moderado	Devem ser feitos esforços para reduzir o risco, mas os custos de prevenção devem ser cuidadosamente medidos e limitados. As medidas de redução de risco devem ser implementadas dentro de um período de tempo definido. Quando o risco moderado é associado a consequências muito graves ou catastróficas pode ser necessária uma avaliação adicional a fim de estimar, mais precisamente, a probabilidade de dano, para determinar a necessidade de medidas de controle.
IV	Substancial	As atividades na instalação, área ou sistema não devem ser iniciadas até que o risco tenha sido reduzido. Recursos consideráveis poderão ter que ser alocados para reduzir o risco. Quando o risco envolver atividades em execução, ações urgentes devem ser tomadas.
V	Intolerável	As atividades na instalação, área ou sistema não devem ser iniciadas nem continuar até que o risco tenha sido reduzido. Se não for possível reduzir o risco, nem com recursos ilimitados, as atividades têm que permanecer proibidas.

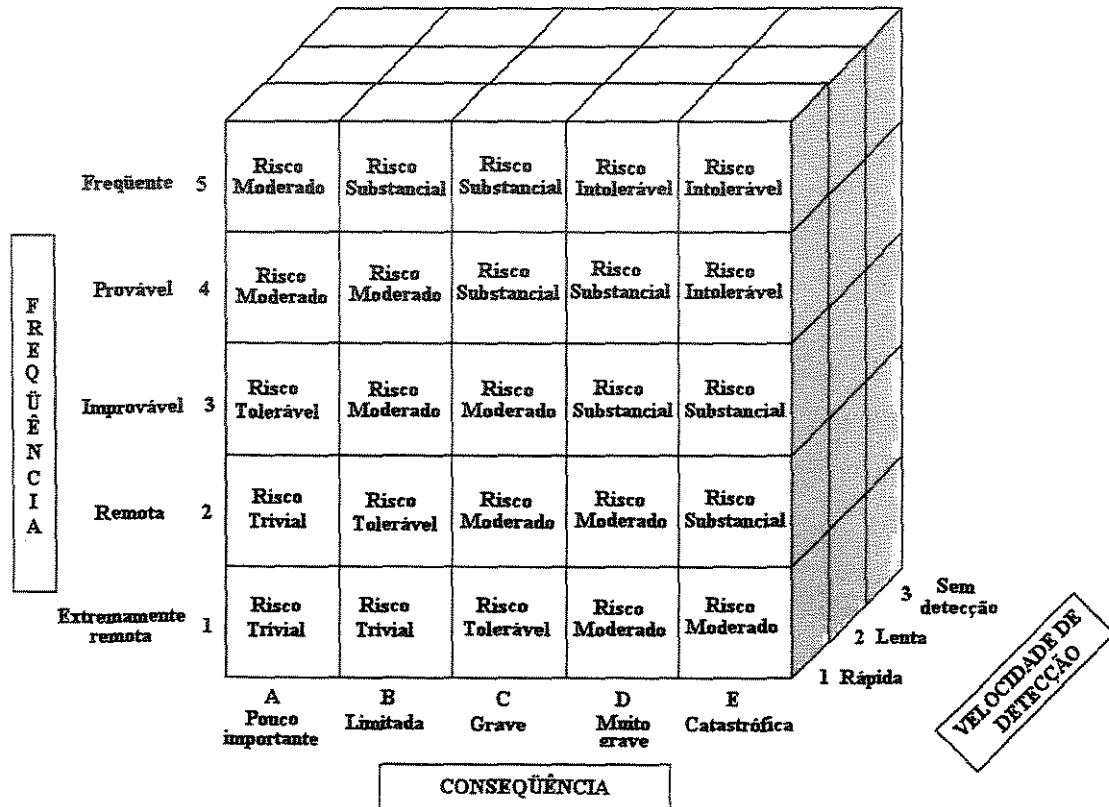


Figura 4.21 - Matriz de risco desenvolvida para avaliar comparativamente a importância dos riscos

5. CASOS EXEMPLOS

Os cenários de acidentes apresentados como casos exemplos foram bastante simplificadas para que a aplicação da metodologia de análise de riscos desenvolvida pudesse ser ilustrada, em espaço adequado, no contexto deste trabalho de Tese. Com esta mesma finalidade os casos exemplos apresentam populações próximas às instalações, condições de operação e outros parâmetros, ajustados para ilustrar a análise e não representam, necessariamente, situações reais.

5.1 Caso Exemplo 1 (baseado em [32, 33])

Em uma instalação industrial hipotética existe um tanque esférico de armazenamento de propano para alimentação de um banco de geradores termoelétricos. Este tanque de 8 m de diâmetro e apoiado no solo, armazena 100.000 kg de propano a 25 °C e 8,2 bar. A tubulação de alimentação dos geradores tem 15 cm de diâmetro e 50 m de comprimento. Considera-se que a alimentação do tanque é feita na sua parte superior, de forma que as consequências de diversos tipos de acidentes possam ser ilustradas. Na Figura 5.1 é apresentado um diagrama esquemático deste sistema. A umidade relativa do ar é de 75 %, o calor de combustão do propano é de 46.350 kJ/kg e a temperatura ambiente é 25 °C.

O leiaute desta instalação é apresentado de forma esquemática na Figura 5.2. Existe a 250 m do tanque de estocagem de propano uma empresa de processamento de dados onde trabalham 150 pessoas (em turno de 24 horas), distribuídas uniformemente numa área de 30 por 20 m. As demais áreas nas vizinhanças da instalação não possuem qualquer edificação, estradas ou pessoas.

Neste caso exemplo será considerado que a instalação industrial não possui qualquer tipo de dispositivo para detecção de possíveis situações que possam levar a um acidente.

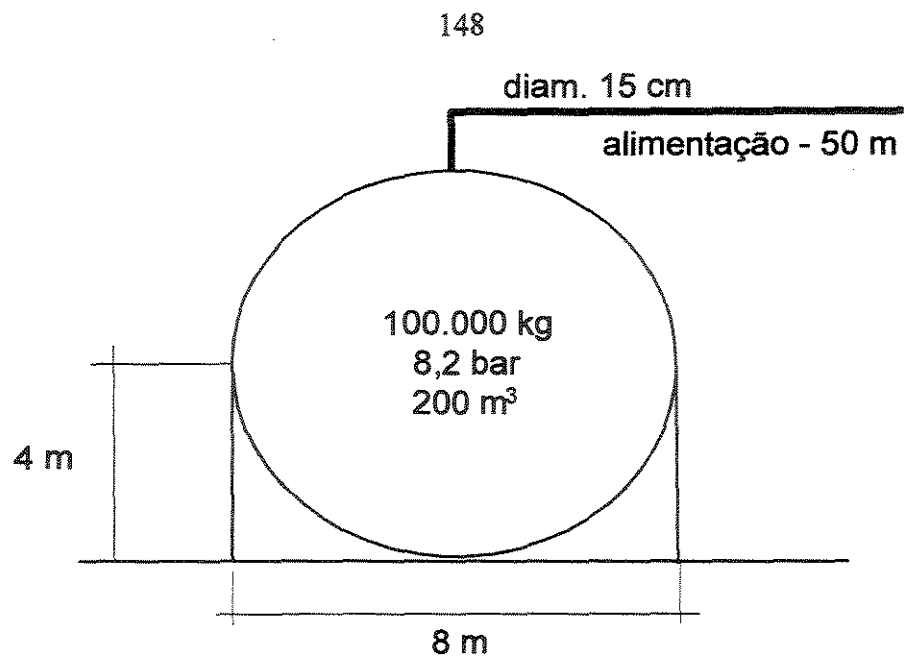


Figura 5.1 - Diagrama esquemático do tanque de armazenamento de propano, e a sua tubulação de alimentação (elaborado a partir de [32])

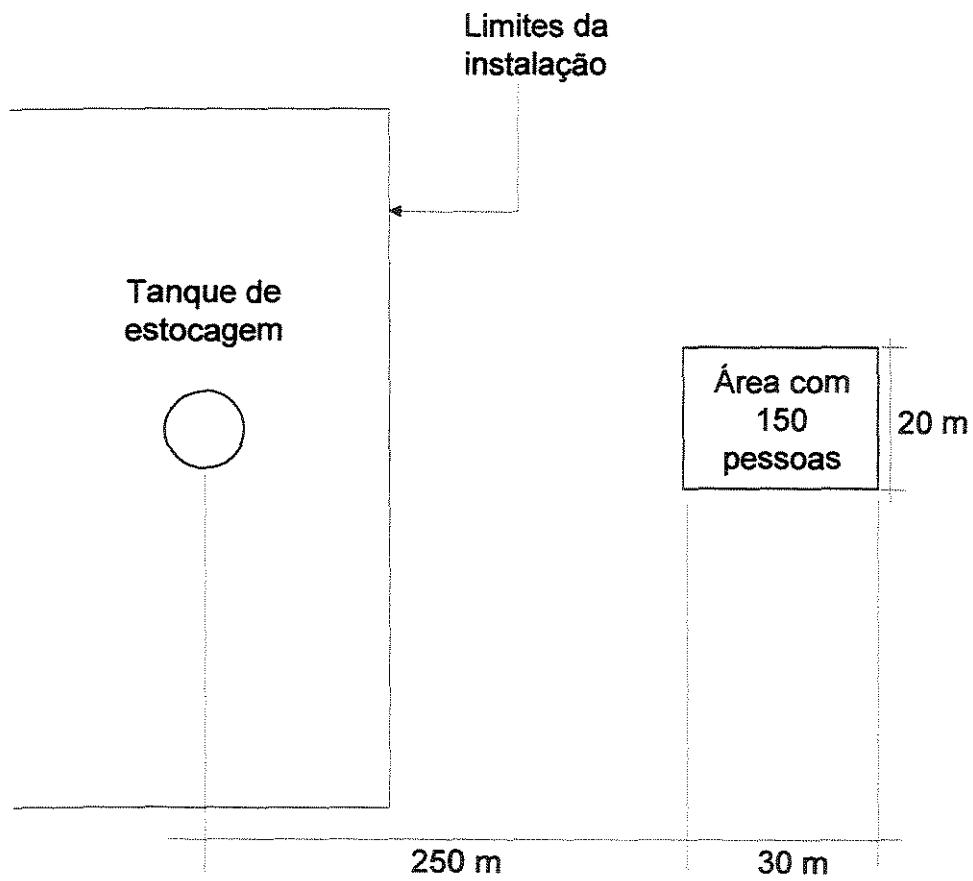


Figura 5.2 - Leiaute da instalação de estocagem de propano (baseado em [33]).

Avaliação de riscos do Caso Exemplo 1

A avaliação de riscos será orientada pela Tabela 4.1.

Coluna 1 (Instalação, Área ou Sistema)

Deve-se identificar a instalação em análise:

- sistema de alimentação de propano do banco de geradores (tanque de armazenamento e linha de alimentação)

Coluna 2 (Descrição das Operações)

Deve-se identificar as operações realizadas na instalação:

- alimentação de um banco de geradores termoelétricos
- enchimento do tanque.

Coluna 3 (Situação de Risco)

Deve-se identificar a quantidade das substâncias, forma de armazenamento ou processamento e tipo de energia responsável pelo risco:

- 100.000 kg de propano,
- substância inflamável/explosiva,
- armazenamento sob pressão,
- fórmula química: C_3H_8
- substância gasosa liquefeita sob pressão.

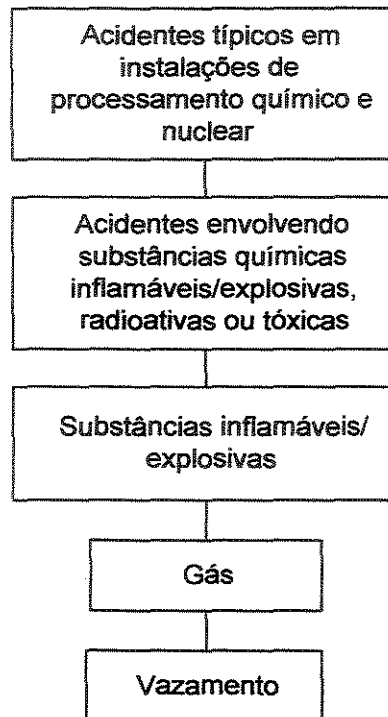
Coluna 4EI – Evento Iniciador (Cenário do Acidente)

Deve-se identificar os eventos iniciadores de acidentes que podem ocorrer com as situações de risco listadas na Coluna 3.

Com as informações sobre a substância causadora da situação de risco e com os diagramas de estrutura hierárquica apresentados na Figura 4.2 o evento identificado é:

- vazamento.

Na figura apresentada a seguir é ilustrado o caminho percorrido nos diagramas de estrutura hierárquica (a) e (b), apresentados na Figura 4.2, para a identificação do evento iniciador.

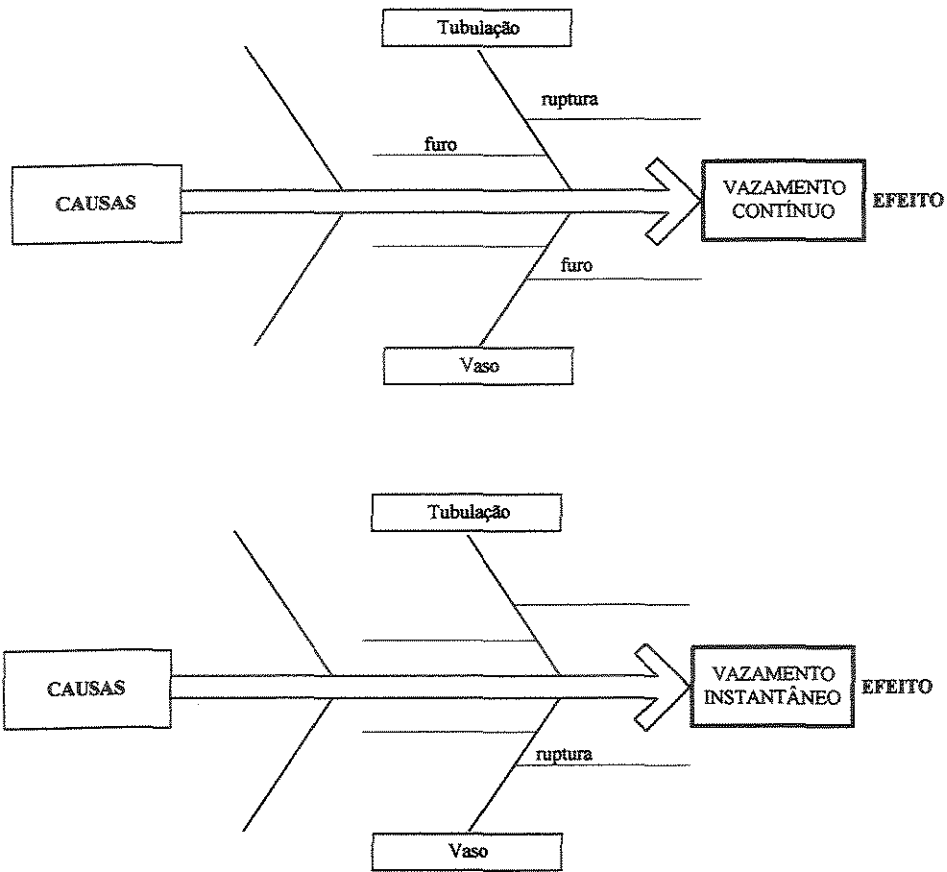


O diagrama apresentado na Figura 4.2 indica, como próximo passo, a árvore de decisão apresentada na Figura 4.3. Esta árvore indica que o vazamento pode ocorrer de duas maneiras:

- vazamento contínuo e
- vazamento instantâneo.

Coluna 4CE – Causa do Evento Iniciador (Cenário do Acidente)

As causas que podem levar aos eventos indicados na Coluna 4EI podem ser identificadas através dos diagramas de causa e efeito, conforme ilustrado a seguir:



Portanto as causas que podem levar aos eventos identificados são:

- *evento*: vazamento contínuo

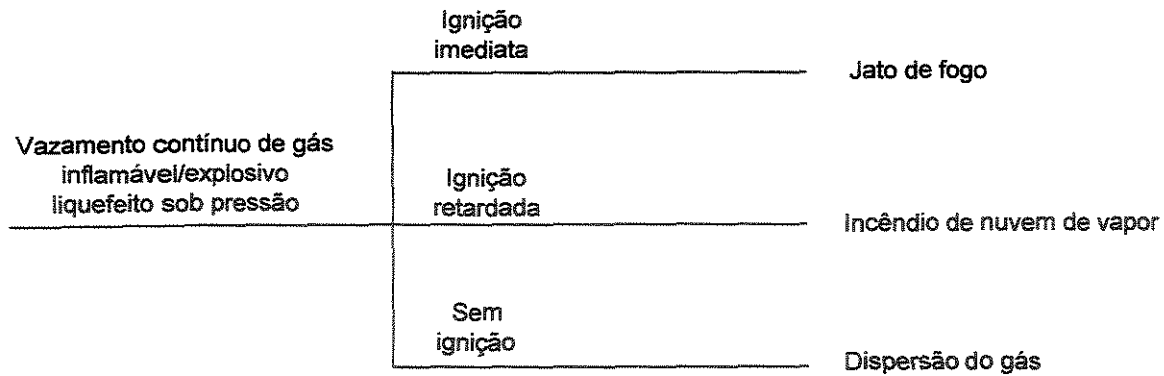
causas: furo ou ruptura da tubulação ou furo no vaso

- *evento*: vazamento instantâneo

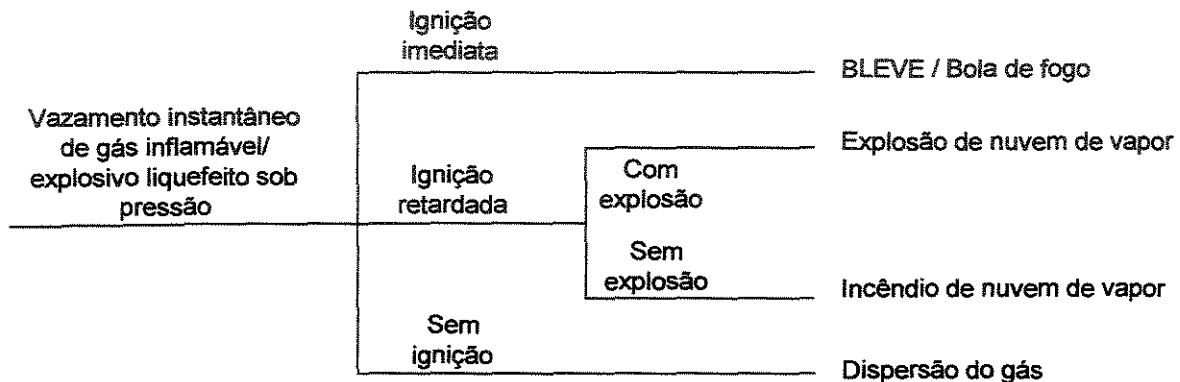
causa: ruptura do vaso

Coluna 4TA – Tipo do Acidente (Cenário do Acidente)

Para vazamento contínuo identifica-se, através da Figura 4.4, quais os tipos de acidentes possíveis de ocorrerem, obtendo-se a seguinte árvore de eventos:



Para vazamento instantâneo identifica-se, através da Figura 4.5, quais os tipos de acidentes possíveis de ocorrerem, obtendo-se a seguinte árvore de eventos:



Das árvores de eventos apresentadas para vazamento contínuo e instantâneo podem ser identificados, para a realização da análise de riscos, os seguintes acidentes:

- Jato de Fogo, devido à ignição imediata em vazamento contínuo;
- Incêndio em Nuvem de Vapor, devido à ignição retardada em vazamento contínuo;
- BLEVE/Bola de Fogo, devido à ignição imediata em vazamento instantâneo;
- Explosão de Nuvem de Vapor, devido à ignição retardada em vazamento instantâneo;
- Incêndio em Nuvem de Vapor, devido à ignição retardada em vazamento instantâneo. Pelas razões apresentadas no item 3.4.7 não será analisado neste caso exemplo o acidente envolvendo incêndio em nuvem de vapor.

Nesta análise será considerada que a ruptura na tubulação ocorrerá na interface com o vaso, e que o rompimento na tubulação corresponde a 100 % do diâmetro do tubo, conforme sugestões apresentadas no item 3.4.6.

Não será apresentada a análise de riscos devido a furo no vaso para que a análise a ser apresentada não se torne muito extensa. No caso de furo em vaso arbitra-se, com base em eventos similares, um diâmetro para o furo no vaso e considera-se um tempo de vazamento de 10 minutos [33].

Coluna 5 (Pessoas sob Ameaça)

Existem 150 pessoas sob ameaça, distribuídas uniformemente em uma área de 30 por 20 m, distando 250 m do tanque de armazenagem em análise (Figura 5.2).

Coluna 6 (Avaliação das Consequências)

- **Jato de Fogo**

- Cálculo do comprimento da chama visível

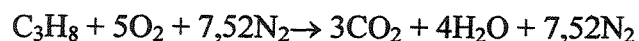
$$\frac{L}{D_j} = \frac{15}{C_M} \times \sqrt{\frac{M_a}{M_c}} \quad (3.27)$$

sendo:

L = comprimento visível da chama turbulenta medida a partir do ponto de vazamento [m];

$$D_j = 0,15\text{m};$$

C_M = fração molar do combustível na mistura estequiométrica combustível/ar:



$$C_M = \frac{1}{1 + 5 + 7,52} = 0,074$$

$$M_a = 29 \times 10^{-3} \text{ [kg/mol] e}$$

$$M_c = 44 \times 10^{-3} \text{ [kg/mol]}.$$

Portanto,

$$L = 0,15 \times \frac{15}{0,074} \times \sqrt{\frac{29 \times 10^{-3}}{44 \times 10^{-3}}}$$

$$L = 24,7 \text{ m}$$

- Determinação do regime do fluxo

Fluxos sônicos atendem à seguinte expressão:

$$\frac{p_1}{p_2} \geq \left(\frac{k+1}{2} \right)^{k/(k-1)} \quad (3.31)$$

Com os dados:

$$p_1 = 8,2 \text{ bar} = 8,2 \times 10^5 \text{ Pa};$$

$$p_2 = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa [Pa];}$$

$$k = 1,13,$$

tem-se:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{8,2 \times 10^5}{1,0 \times 10^5} = 8,2$$

$$\left(\frac{k+1}{2} \right)^{k/(k-1)} = \left(\frac{1,13+1}{2} \right)^{1,13/(1,13-1)} = 1,7$$

∴ o fluxo é sônico.

- Cálculo da vazão mássica

$$\dot{m} = c_d \times A_v \times p_1 \times \sqrt{\frac{k \times G \times M_c}{R_g \times T_1} \times \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k+1/k-1}} \quad (3.29)$$

Dados:

$$c_d = 1;$$

$$A_v = 17,67 \times 10^{-3} \text{ m}^2;$$

$$p_1 = 8,2 \times 10^5 \text{ Pa};$$

$$G = 1 \text{ kg.m/N.s}^2;$$

$$R_g = 0,082057 \text{ m}^3.\text{atm/kmol.K};$$

$$T_1 = 293 \text{ K e}$$

$$M_c = 44 \text{ [kg/kmol]}.$$

$$\dot{m} = 1 \times 17,67 \times 10^{-3} \times 8,2 \times 10^5 \times \sqrt{\frac{1,13 \times 1 \times 44}{0,082057 \times 10^5 \times 293} \times \left(\frac{2}{1,13+1}\right)^{1,13+1} / 1,13-1}$$

$$\dot{m} = 39,31 \text{ kg/s}$$

O tempo de duração do jato de fogo pode ser calculado da seguinte forma:

$$t_{jf} = \frac{100000}{39,31} = 2544 \text{ s}$$

- Cálculo da radiação térmica, E_r , no ponto de interesse

$$E_r = \tau_a \times f \times \dot{m} \times \Delta H_c \times F_p \quad (3.28)$$

sendo:

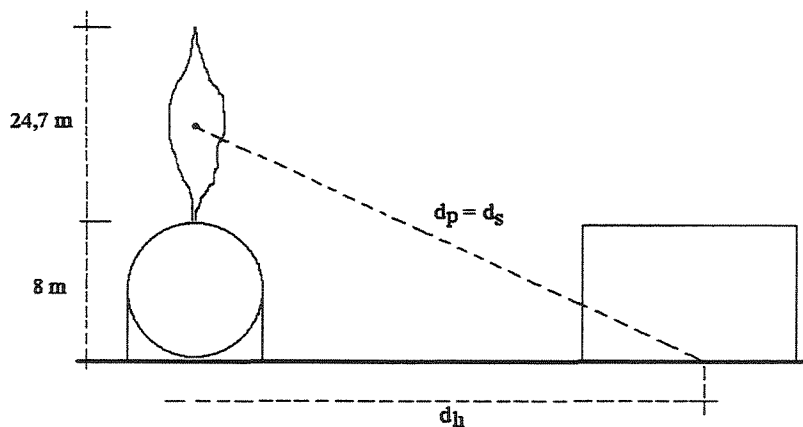
$$\tau_a = 2.02 \times (p_w \times d_s)^{-0,09} \quad (3.23)$$

$$p_w = 1013,25 \times u_a \times \exp\left(14,4114 - \frac{5328}{T_a}\right) \quad (3.24)$$

Considerando a chama como uma fonte pontual,

$$F_p = \frac{1}{4 \times \pi \times d_p^2} \quad (3.22)$$

No diagrama a seguir é apresentado um esquema do acidente em análise.



Dados:

$$f = 0,30;$$

$$\dot{m} = 39,31 \text{ kg/s};$$

$$\Delta H_c = 46350 \text{ kJ/kg e}$$

$$u_a = 75 \text{ \%}.$$

Portanto tem-se:

$$p_w = 1013,25 \times 75 \times \exp\left(14,4114 - \frac{5328}{293}\right) = 1747 \text{ Pa}$$

Para o cálculo da radiação térmica recebida pelas pessoas na área em estudo considerou-se que existirão, a cada intervalo de 10 metros (distância horizontal), 50 pessoas.

d_h [m]	d_s [m]	τ_a
260	260,5	0,63
270	270,5	0,62
280	280,5	0,62

d_h [m]	d_p [m]	F_p
260	260,5	$1,17 \times 10^{-6}$
270	270,5	$1,09 \times 10^{-6}$
280	280,5	$1,01 \times 10^{-6}$

Os valores da energia térmica recebida nos pontos de interesse e suas consequências para 30 segundos de exposição, de acordo com a Figura 3.2, são:

d_h [m]	E_r [kW/m ²]	Nº de pessoas	Conseqüências
260	0,40	50	nenhum dano
270	0,37	50	nenhum dano
280	0,34	50	nenhum dano

Conseqüência do acidente envolvendo jato de fogo:

- nenhum dano às pessoas.

• **BLEVE/Bola de Fogo**

- Cálculo da distância entre o centro da bola de fogo e o ponto de interesse

$$d_b = \sqrt{d_h^2 + h_b^2} \quad (3.10)$$

sendo:

$$h_b = 0,75 \times D_{bmax} \quad (3.11)$$

$$D_{bmax} = 5,8 \times M_b^{1/3} \quad (3.12)$$

onde:

$$M_b = 100000 \text{ [kg]}.$$

portanto:

$$D_{bmax} = 5,8 \times 100000^{1/3} = 269,2 \text{ m};$$

$$h_b = 0,75 \times 269,2 = 201,9 \text{ m}$$

d_h [m]	d_b [m]
260	329,0
270	337,0
280	345,0

- Cálculo do tempo de duração do BLEVE/Bola de Fogo

$$t_d = 2,6 \times M_b^{1/6} \quad (3.14)$$

$$t_d = 2,6 \times 100000^{1/6} = 17,7 \text{ s}$$

- Cálculo da radiação térmica no ponto de interesse

$$E_r = \frac{2,2 \times \tau_a \times f_e \times \Delta H_c \times M_b^{2/3}}{4 \times \pi \times d_b^2} \quad (3.9)$$

sendo:

$$f_e = 0,4.$$

Os valores da energia térmica recebida nos pontos de interesse e suas consequências para 17,7 segundos de exposição, de acordo com a Figura 3.2, são:

d_b [m]	E_r [kW/m ²]	Nº de pessoas	Consequências
260	40,70	50	morte de 1% das pessoas, queimadura de segundo grau
270	38,18	50	morte de 1% das pessoas, queimadura de segundo grau
280	36,43	50	morte de 1% das pessoas, queimadura de segundo grau

Consequência do acidente envolvendo BLEVE/Bola de Fogo:

- morte de duas pessoas e queimadura de segundo grau nas demais.

• Explosão de Nuvem de Vapor

- Cálculo da massa equivalente do combustível na nuvem (W), em quilos de TNT

$$W = F_e \times M_n \times \frac{\Delta H_c}{4680} \quad (3.7)$$

sendo:

$$M_n = M_l \times f_i \times 2 \quad (3.6)$$

$$f_i = 1 - \exp\left[\frac{-C_p \times \Delta T}{C_L}\right] \quad (3.5)$$

onde:

$$F_e = 0,03;$$

M_n = massa de combustível na nuvem [kg] e

$M_1 = 100000$ kg.

f_i = fração de ignição;

$C_p = 2,41$ [kJ/kg.K];

Temperatura ambiente = 298 K;

Temperatura de ebulição do propano à pressão ambiente = 231 K e

$C_L = 410$ kJ/kg;

$$f_i = 1 - \exp\left[\frac{-2,41 \times 67}{410}\right] = 0,33$$

$$M_n = 100000 \times 0,33 \times 2 = 66000 \text{ kg}$$

$$W = 0,03 \times 66000 \times \frac{46350}{4680} = 19610 \text{ kg}$$

- Cálculo do valor da sobrepressão no ponto de interesse

$$\bar{d} = \frac{d_r}{W^{1/3}} \quad (3.8)$$

onde:

$\bar{d}$ = distância normalizada [m/kg^{1/3}] e

d_r = distância real entre o material explosivo e o ponto de interesse [m].

Os valores da sobrepressão recebida nos pontos de interesse e suas consequências, de acordo com a Tabela 3.7, são:

d_r [m]	$\bar{d}$	P_s [bar]	Nº de pessoas	Consequências
260	9,64	0,17	50	morte de 1% das pessoas, e ferimentos em 10 %
270	10,01	0,16	50	morte de 1% das pessoas, e ferimentos em 10 %
280	10,38	0,16	50	morte de 1% das pessoas, e ferimentos em 10 %

Consequência do acidente envolvendo Explosão de Nuvem de Vapor:

- morte de duas pessoas e ferimentos em quinze.

Coluna 7P – Pessoas sob Ameaça (Classificação das Consequências)

A classificação das consequências para as pessoas é feita utilizando-se a Tabela 4.2, conforme apresentado a seguir.

Acidente	Consequência	Classe
Jato de Fogo, em vazamento contínuo	Nenhum dano às pessoas	A
BLEVE/Bola de Fogo, em vazamento instantâneo	Morte de duas pessoas e queimadura de segundo grau nas demais	C
Explosão de Nuvem de Vapor, em vazamento instantâneo	Morte de duas pessoas e ferimentos em quinze	C

Coluna 7V - Velocidade de Detecção (Classificação das Consequências)

A classificação da velocidade de detecção dos acidentes, apresentada a seguir, é feita com o auxílio da Tabela 4.3.

Acidente	Velocidade de detecção	Classe
Jato de Fogo, em vazamento contínuo	Sem detecção	3
BLEVE/Bola de Fogo, em vazamento instantâneo	Sem detecção	3
Explosão de Nuvem de Vapor, em vazamento instantâneo	Sem detecção	3

Coluna 8 (Frequência)

Neste caso exemplo será considerado que existem disponíveis registros de taxas de falhas de projetos similares ao caso em análise, que podem ser utilizados para estimar a frequência de ocorrência dos eventos iniciadores. As taxas de falhas básicas, hipotéticas, são apresentadas na tabela a seguir [33]:

Item	Tipo de falha	Taxa de falhas
Tubo com diâmetro maior que 150 mm	Ruptura	$8,8 \times 10^{-8}$ [1/metro.ano]
Tanque de armazenagem de propano	Ruptura	$6,5 \times 10^{-6}$ [1/vaso.ano]

As frequências de ocorrência dos eventos identificado (ruptura da tubulação e ruptura do vaso) são:

- ruptura da tubulação (vazamento contínuo)

$$f = 8,8 \times 10^{-8} \times 50 = 4,4 \times 10^{-6} [\text{ano}^{-1}]$$

- ruptura do vaso (vazamento instantâneo)

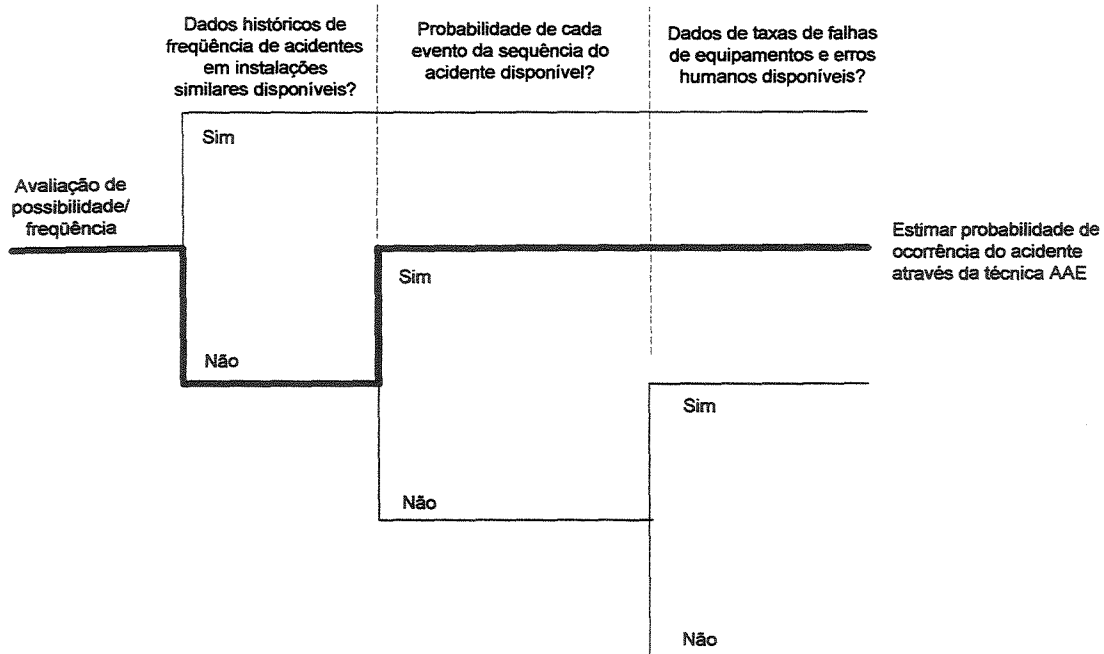
$$f = 6,5 \times 10^{-6} \times 1 = 6,5 \times 10^{-6} [\text{ano}^{-1}].$$

A frequência de ocorrência de cada tipo de acidente é determinada pela frequência de ocorrência do evento iniciador, e pela contribuição da probabilidade de ocorrência de cada ramo das árvores de eventos identificadas para o preenchimento da coluna 4TA. Admite-se, também, que estão disponíveis estes dados de probabilidade. Em uma avaliação real de risco é importante que se use fontes validadas para estabelecer a probabilidade de ocorrência de cada evento da sequência do acidente em análise.

Neste caso exemplo a probabilidade de ocorrência de cada ramo da árvore de eventos, definida para o preenchimento da coluna 4TA, foi estimado utilizando-se julgamentos de engenharia [33], obtendo-se:

Causa	Probabilidade
Ignição imediata	0,25
Ignição retardada	0,65
Sem ignição	0,1
Com explosão	0,5
Sem explosão	0,5

Para escolha da técnica mais adequada para estimar a possibilidade/frequência de ocorrência dos acidentes em análise utiliza-se a árvore de decisão apresentada na Figura 4.20, obtendo-se o caminho indicado pela linha em destaque na figura a seguir.



O uso da Figura 4.20, com os dados disponíveis, indica que a estimativa da frequência de ocorrência do acidente pode ser feito através da técnica da Análise de Árvore de Eventos.

A frequência de ocorrência de cada tipo de acidente é determinada pela frequência de ocorrência do evento iniciador, e pela contribuição da probabilidade de ocorrência de cada ramo das árvores de eventos, que já foram identificadas para o preenchimento da coluna 4TA, obtendo-se:

- ruptura de tubulação (vazamento contínuo)

Ruptura de tubulação (vazamento contínuo) $f=4,4 \times 10^{-6} [\text{ano}^{-1}]$	Ignição imediate $p=0,25$	Jato de fogo $f=1,1 \times 10^{-6} [\text{ano}^{-1}]$
	Ignição retardada $p=0,65$	Incêndio de nuvem de vapor $f=2,9 \times 10^{-6} [\text{ano}^{-1}]$
	Sem ignição $p=0,1$	Dispersão do gás $f=4,4 \times 10^{-7} [\text{ano}^{-1}]$

- ruptura de vaso (vazamento instantâneo)

Ruptura de vaso (vazamento instantâneo) $f=6,5 \times 10^{-6} [\text{ano}^{-1}]$	Ignição imediate		BLEVE / Bola de fogo $f=1,6 \times 10^{-6} [\text{ano}^{-1}]$
	p=0,25	Com explosão	
	Ignição retardada	p=0,5	Explosão de nuvem de vapor $f=2,1 \times 10^{-6} [\text{ano}^{-1}]$
		Sem explosão	Incêndio de nuvem de vapor $f=2,1 \times 10^{-6} [\text{ano}^{-1}]$
	p=0,65	p=0,5	Dispersão do gás $f=6,5 \times 10^{-7} [\text{ano}^{-1}]$
	Sem ignição		
	p=0,1		

A classificação das frequências de ocorrência dos acidentes analisados é feita utilizando-se a Tabela 4.4, conforme apresentado a seguir.

Acidente	Característica (frequência)	Classe
Jato de Fogo, em vazamento contínuo	$1,1 \times 10^{-6} [\text{ano}^{-1}]$	1
BLEVE/Bola de Fogo, em vazamento instantâneo	$1,6 \times 10^{-6} [\text{ano}^{-1}]$	1
Explosão de Nuvem de Vapor, em vazamento instantâneo	$2,1 \times 10^{-6} [\text{ano}^{-1}]$	1

Coluna 9 (Importância)

A importância do acidente, em termos de risco, depende da frequência de ocorrência do acidente e da sua consequência. A velocidade de detecção é um parâmetro que pode ser utilizado para priorização de riscos de mesma magnitude. A seguir são apresentadas as classes de consequências, frequência e velocidade de detecção para os acidentes analisados.

Acidente	Classe		
	Consequência	Frequência	Velocidade de detecção
Jato de Fogo, em vazamento contínuo	A	1	3
BLEVE/Bola de Fogo, em vazamento instantâneo	C	1	3

Explosão de Nuvem de Vapor, em vazamento instantâneo	C	1	3
--	---	---	---

Com os dados apresentados acima e com auxílio da Figura 4.21, identifica-se o nível do risco dos acidentes analisados.

A classificação da importância é feita através da Tabela 4.6 obtendo-se:

Acidente	Nível do risco	Classe de importância
Jato de Fogo, em vazamento contínuo	Trivial	I
BLEVE/Bola de Fogo, em vazamento instantâneo	Tolerável	II
Explosão de Nuvem de Vapor, em vazamento instantâneo	Tolerável	II

Coluna 10 (Comentários)

Acidente	Classe de importância	Comentários
Jato de Fogo, em vazamento contínuo	I	Nenhuma ação é requerida para redução do risco e nenhum registro documental precisa ser mantido.
BLEVE/Bola de Fogo, em vazamento instantâneo	II	Nenhum controle adicional é necessário. Pode-se considerar uma solução mais econômica ou aperfeiçoamento para redução de riscos que não imponha custos extras. A monitoração é necessária para assegurar que os controles sejam mantidos.
Explosão de Nuvem de Vapor, em vazamento instantâneo		

A seguir são apresentadas a planilha simplificada, que serviu como orientação para orientação para a aplicação da metodologia desenvolvida, com o resumo da análise de riscos efetuada, e a matriz de risco correspondente.

Instalação, Área ou Sistema	Descrição das Operações	Situação de Risco	Cenário do Acidente			Pessoas sob Ameaça	Avaliação das Conseqüências	Classificação das Conseqüências		Freq	Imp.	Comentários
1	2	3	4			5	6	7		8	9	10
			EI	CE	TA			P	V			
Sistema de alimentação de propano do banco de geradores (tanque de armazenamen to e linha de alimentação)	- Alimenta- ção de um banco de ge- radores ter- moelétricos - Enchimento do tanque	- 100.000 kg de propano	EI1	CE1	TA1	150 pessoas	Nenhum dano às pessoas	A	3	1	I	Nenhuma ação é re- querida para redução do risco e nenhum re- gistro documental pre- cisa ser mantido.
		- Substância inflamável/ explosiva										
		- Armazena- mento sob pressão	EI2	CE2	TA2	150 pessoas	Morte de 2 pessoas e queimadura de segundo grau nas demais	C	3	1	II	Nenhum controle adi- cional é necessário. Pode-se considerar uma solução mais eco- nômica ou aperfeiço- amento para redução d riscos que não impo- nha custos extras. A monitoração é neces- sária para assegurar que os controles sejam mantidos.
		- Fórmula química: C ₃ H ₈										
		- Substância gasosa lique- feita sob pressão	EI2	CE2	TA3	150 pessoas	Morte de 2 pessoas e ferimentos em 15	C	3	1	II	

EI = Evento Iniciador CE = Causa do Evento Iniciador TA = Tipo do Acidente P = Pessoas sob Ameaça V = Velocidade de Detecção Freq = Frequência
Imp = Importância

EI1 = Vazamento contínuo

CE1 = Furo ou ruptura da tubulação

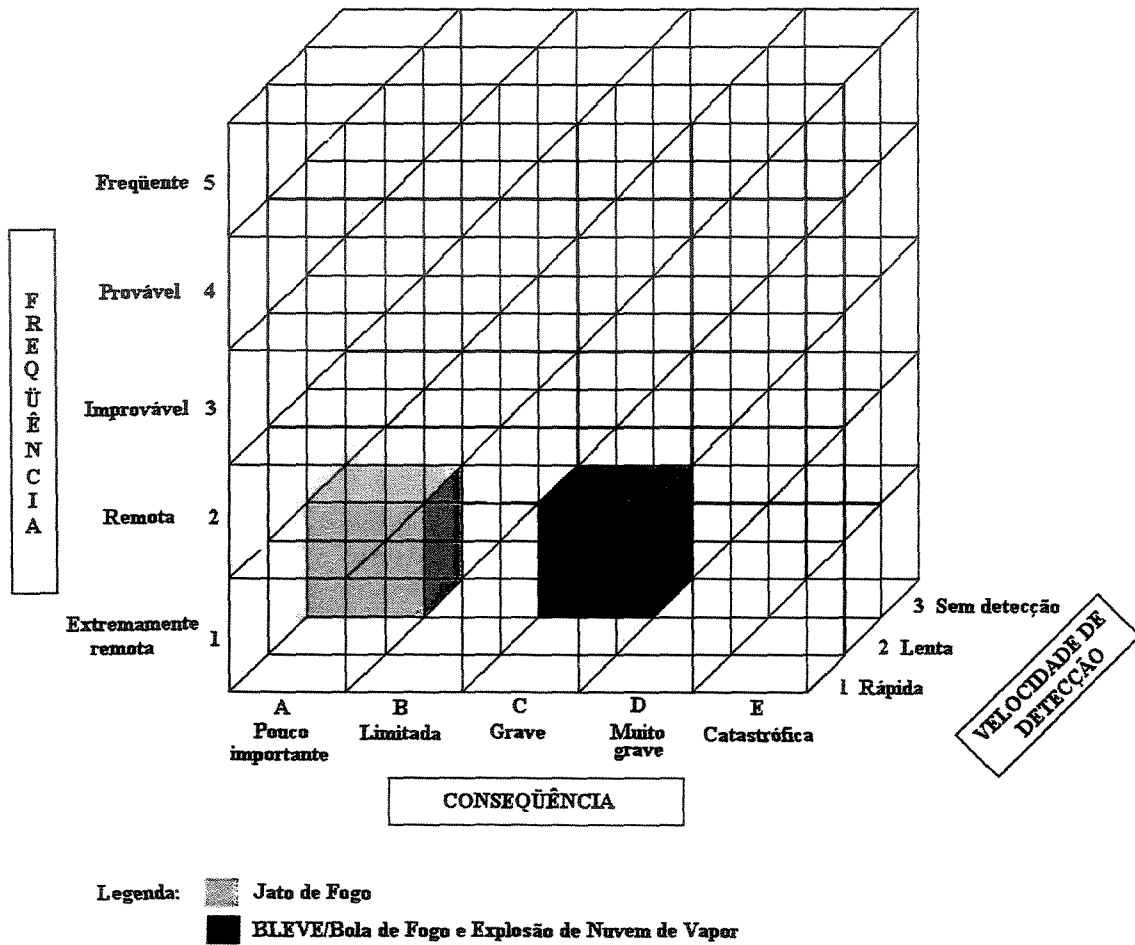
TA1 = Jato de fogo

EI2 = Vazamento instantâneo

CE2 = Ruptura do vaso

TA2 = BLEVE/Bola de fogo

TA3 = Explosão em nuvem de vapor



5.2 Caso Exemplo 2 (baseado em [87])

Uma fábrica de elementos combustíveis para centrais nucleares tem capacidade para armazenar, em caixas metálicas, 100 ton de pastilhas de UO_2 com enriquecimento de 5 % em U-235.

A área destinada para armazenagem deste material tem dimensões de 20 por 30 m e 6 m de pé direito e possui um sistema de exaustão com vazão de $36.000 \text{ m}^3/\text{h}$, estando o ponto de liberação localizado sobre a fábrica a uma altura de 10 m. Não existe, nesta área, a presença de qualquer material inflamável/explosivo.

A um quilômetro desta fábrica existe uma cidade com 3.000 habitantes distribuídos uniformemente na sua área urbana, que tem dimensões de 2 por 3 km. Na Figura 5.3 é apresentado, de forma esquemática, um leiaute de situação descrita.

Neste caso exemplo será considerado que a fábrica não dispõe de qualquer tipo de dispositivo para detecção de possíveis situações que possam levar a um acidente. Não serão considerados também, fatores de atenuação tais como eficiência de filtros, blindagens, etc.

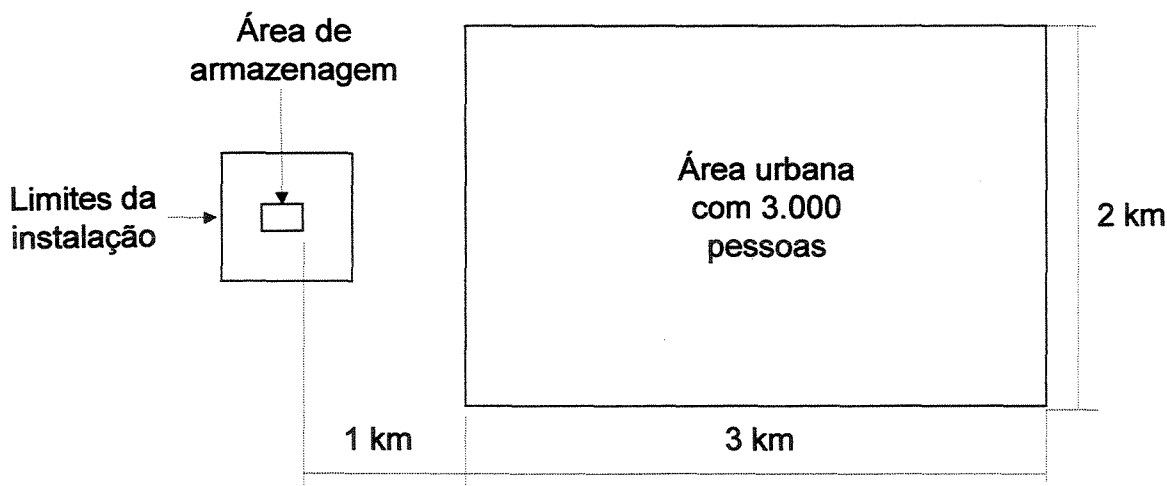


Figura 5.3 - Leiaute da instalação de armazenagem de UO_2 , com enriquecimento de 5 % em U-235.

Avaliação de riscos do Caso Exemplo 2

A avaliação de riscos será orientada pela Tabela 4.1.

Coluna 1 (Instalação, Área ou Sistema)

Deve-se identificar a instalação em análise:

- área de armazenamento de UO_2 com enriquecido de 5 % em U-235.

Coluna 2 (Descrição das Operações)

Deve-se identificar as operações realizadas na instalação:

- manuseio e transporte de caixas metálicas contendo UO_2 com enriquecido de 5 % em U-235.

Coluna 3 (Situação de Risco)

Deve-se identificar a quantidade das substâncias, forma de armazenamento e tipo de energia responsável pelo risco:

- 100.000 kg de UO_2 ,
- armazenamento de pastilhas de UO_2 em caixas metálicas,
- substância sólida radioativa.

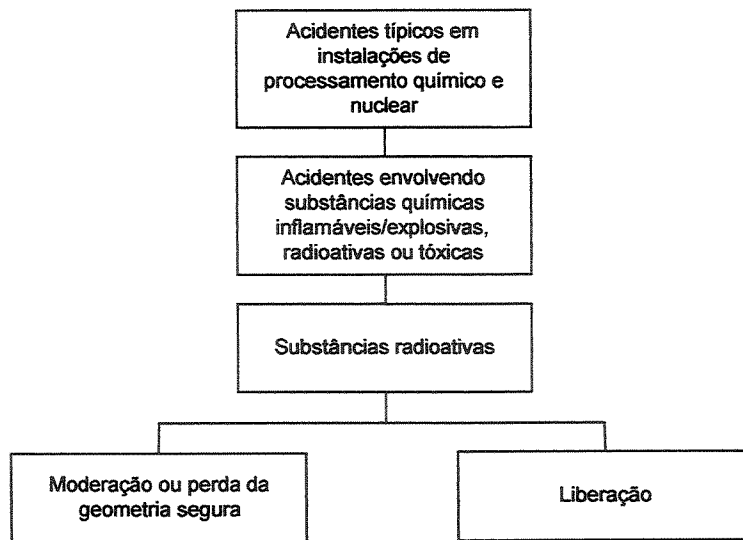
Coluna 4EI – Evento Iniciador (Cenário do Acidente)

Deve-se identificar os eventos iniciadores de acidentes que podem ocorrer com a situação de risco listada na Coluna 3.

Com as informações sobre a substância causadora da situação de risco e com os diagramas de estrutura hierárquica apresentados na Figura 4.2 os eventos identificados são:

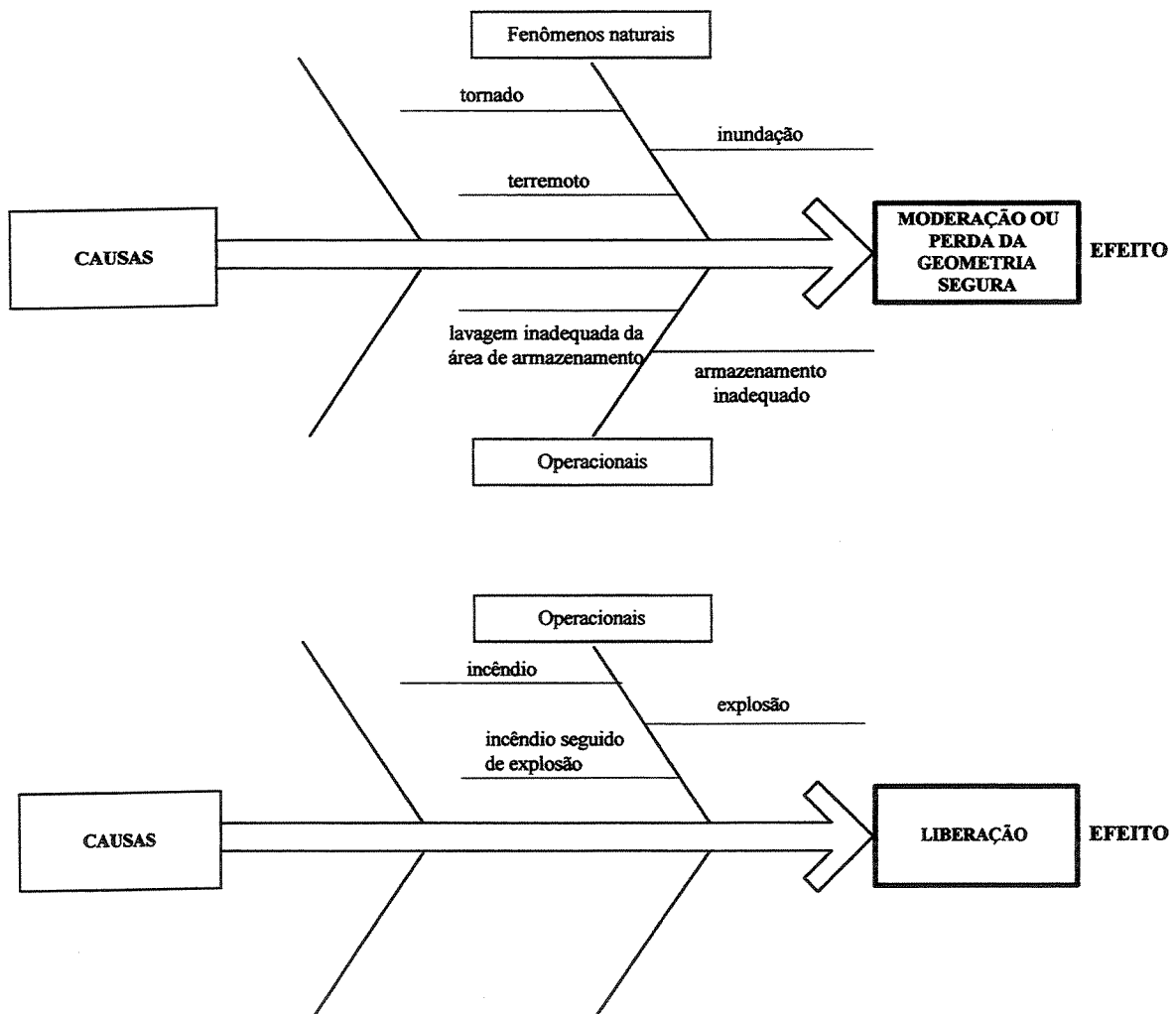
- moderação ou perda da geometria segura de material nucleare
- liberação de produtos de fissão.

Na Figura apresentada a seguir é ilustrado o caminho percorrido nos diagramas de estrutura hierárquica (a) e (b), apresentados na Figura 4.2, até a identificação do evento iniciador.



Coluna 4CE – Causa do Evento Iniciador (Cenário do Acidente)

As causas que podem levar ao evento indicado na Coluna 4EI podem ser identificadas através dos diagramas de causa e efeito conforme ilustrado a seguir:



Portanto, as causas que podem levar aos eventos identificados são:

- *evento*: moderação ou perda da geometria segura de material nuclear

causas: tornado, inundação, terremoto, lavagem inadequada da área de armazenamento

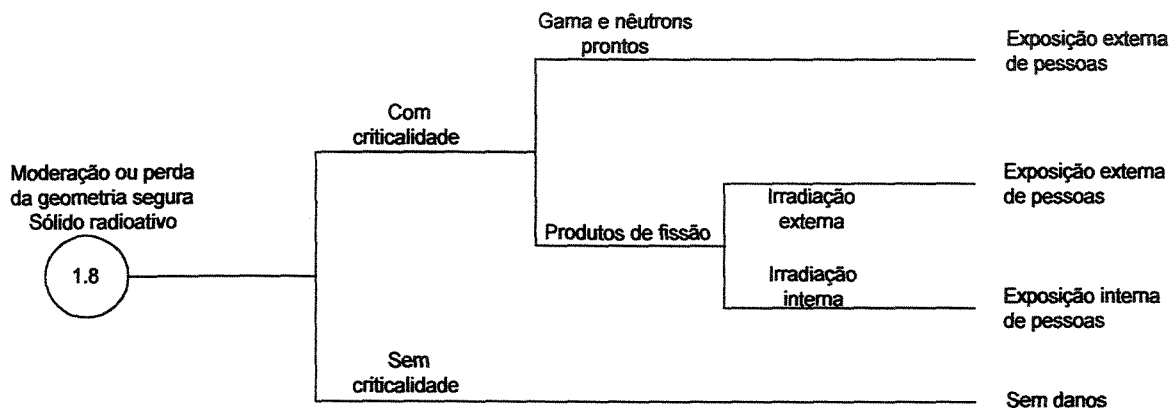
- *evento*: liberação de produtos de fissão

causa: incêndio, explosão, incêndio seguido de explosão.

Como não existe a presença de material inflamável/explosivo na área de armazenamento, o evento liberação não será considerado nesta análise.

Coluna 4TA – Tipo do Acidente (Cenário do Acidente)

O diagrama apresentado na Figura 4.2 indica, para definição do cenário do acidente, a Figura 4.14 para o evento de moderação ou perda da geometria segura, obtendo-se a seguinte árvore de eventos:



Da árvore de eventos apresentada para moderação ou perda da geometria segura podem ser identificados, para a realização da análise de riscos, os seguintes acidentes:

- Exposição externa de pessoas a raios gama, nêutrons e produtos de fissão;
- Exposição interna a produtos de fissão.

A criticalidade gera, simultaneamente, raios gama, nêutrons prontos e radionuclídeos produtos de fissão. Desta forma, as pessoas expostas receberão dose devida à gama e nêutrons prontos e devida à imersão e inalação dos produtos de fissão.

Coluna 5 (Pessoas sob Ameaça)

Existem 3.000 pessoas sob ameaça. Essas estão distribuídas uniformemente em uma área de 2 por 3 km, distando um quilômetro da área de armazenamento de UO₂. (Figura 5.3).

Coluna 6 (Avaliação das Consequências)

• **Exposição externa de pessoas**

- Cálculo da dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida a raios gama e nêutrons prontos

$$H_{E\gamma} = 2,1 \times 10^{-22} \times N \times d_c^{-2} \times e^{-3,4d_c} \quad (3.38)$$

$$H_{En} = 7 \times 10^{-22} \times N \times d_c^{-2} \times e^{-5,2d_c} \quad (3.39)$$

onde:

$H_{E\gamma}$ = dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida aos raios gama, em Sv;

H_{En} = dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida aos nêutrons, em Sv;

$N = 10^{18}$ fissões [54] e

d_c = distância entre o local onde ocorreu a criticalidade e o ponto de interesse, em km.

Para o cálculo da dose equivalente efetiva considerou-se que na área urbana, a 1.500 m, 2.500 m e 3.500 m do local de armazenamento de UO₂ (distância horizontal), existirão 1.000, 2.000 e 3.000 pessoas respectivamente. Esta consideração tem como objetivo limitar o número de cálculos neste caso exemplo, e considera o ponto médio de cada intervalo de 1 km (distância horizontal) da área urbana, onde haveriam 1.000 pessoas.

As doses equivalentes efetivas no corpo inteiro devida aos raios gama são:

d_c [km]	$H_{E\gamma}$ [Sv]
1,5	$5,69 \times 10^{-7}$
2,5	$6,84 \times 10^{-9}$
3,5	$1,16 \times 10^{-10}$

As doses equivalentes efetivas no corpo inteiro devida aos nêutrons são:

d_c [km]	H_{En} [Sv]
1,5	$1,27 \times 10^{-7}$
2,5	$2,53 \times 10^{-10}$
3,5	$7,13 \times 10^{-13}$

As doses equivalentes efetivas no corpo inteiro devida a raios gama e nêutrons prontos são:

d_c [km]	$H_{E\gamma} + H_{En}$ [Sv]
1,5	$6,97 \times 10^{-7}$
2,5	$7,09 \times 10^{-9}$
3,5	$1,17 \times 10^{-10}$

- Cálculo da dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida à radiação externa proveniente da liberação de material radioativo, emissores gama, para a atmosfera

$$H_{Ei} = 6,76 \times 10^{-14} \times \frac{\chi}{Q}(d) \times \sum_i^n \bar{E}\gamma_i \times Q_i \quad (3.40)$$

onde:

H_{Ei} = dose equivalente efetiva no corpo inteiro devida ao radionuclídeo i emissor gama [Sv],

$6,76.10^{-14}$ = fator de conversão [Sv.m³.des/Bq.MeV.s],

$\frac{\chi}{Q}(d)$ = fator de difusão atmosférica em função da distância [s/m³],

$\bar{E}\gamma_i$ = energia média dos raios gama do radionuclídeo i [MeV/des] e

Q_i = atividade total do radionuclídeo i liberada para a atmosfera [Bq],

sendo:

$$Q_i = Q_{oi} \times \frac{\lambda'}{\lambda_i + \lambda'} \times (1 - e^{-(\lambda_i + \lambda')t_a}) \quad (3.41)$$

onde:

Qo_i = atividade total do radionuclídeo i liberada na sala de armazenamento de UO_2 [Bq],

$$\lambda' = R_e/V \text{ [1/s]},$$

$$R_e = 36.000 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V = 3.600 \text{ m}^3,$$

$$\lambda_i = \text{constante de decaimento do radionuclídeo i [1/s] e}$$

t_a = tempo de permanência do indivíduo a uma distância d do local do acidente [s].

A nuvem formada pelos produtos de fissão move-se impulsionada pelo vento. Para fins de estimativa da dose recebida por um indivíduo localizado ao nível do solo, considera-se que durante 8 horas ele permanecerá envolvido pela nuvem [53].

Na tabela apresentada a seguir constam os radionuclídeos emissores gama mais importantes gerados num acidente de criticalidade, suas atividades totais para 10^{18} fissões, a energia média dos raios gama emitidos e a constante de decaimento [53].

Radionuclídeo	Atividade após 8 horas [Bq]	$\bar{E}_\gamma$ [MeV/des]	λ [s ⁻¹]
Kr-83m	$5,9 \times 10^{11}$	$2,6 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-4}$
Kr-85m	$5,6 \times 10^{11}$	$1,6 \times 10^{-1}$	$4,3 \times 10^{-5}$
Kr-85	$5,9 \times 10^6$	$2,2 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-9}$
Kr-87	$3,7 \times 10^{12}$	$7,8 \times 10^{-1}$	$1,5 \times 10^{-4}$
Kr-88	$2,4 \times 10^{12}$	2,0	$6,9 \times 10^{-5}$
Kr-89	$1,6 \times 10^{14}$	1,6	$3,6 \times 10^{-3}$
Xe-131m	$3,0 \times 10^8$	$2,0 \times 10^{-2}$	$6,7 \times 10^{-7}$
Xe-133m	$6,7 \times 10^9$	$4,1 \times 10^{-2}$	$4,0 \times 10^{-6}$
Xe-133	$1,0 \times 10^{11}$	$4,6 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-6}$
Xe-135m	$8,1 \times 10^{12}$	$4,3 \times 10^{-2}$	$7,4 \times 10^{-4}$
Xe-135	$1,3 \times 10^{12}$	$2,5 \times 10^{-1}$	$2,1 \times 10^{-5}$
Xe-137	$1,8 \times 10^{14}$	$1,6 \times 10^{-1}$	$3,0 \times 10^{-3}$
Xe-138	$4,8 \times 10^{13}$	1,1	$8,1 \times 10^{-4}$
I-131	$3,3 \times 10^{10}$	$3,8 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-6}$
I-132	$4,1 \times 10^{12}$	2,2	$8,4 \times 10^{-5}$
I-133	$5,9 \times 10^{11}$	$6,1 \times 10^{-1}$	$9,3 \times 10^{-6}$
I-134	$1,7 \times 10^{13}$	2,6	$2,2 \times 10^{-4}$
I-135	$1,7 \times 10^{12}$	1,5	$2,9 \times 10^{-5}$

Na tabela a seguir são apresentados os fatores de difusão atmosférica, em função da distância, para velocidade do vento de 1 m/s, classe de estabilidade F e liberação ao nível do solo (até 10 m de altura) [53].

d_c [km]	χ/Q [s/m ³]
1,5	$3,67 \times 10^{-4}$
2,5	$1,71 \times 10^{-4}$
3,5	$1,05 \times 10^{-4}$

A tabela a seguir apresenta os resultados do cálculo da dose equivalente efetiva no corpo inteiro, para cada um dos radionuclídeos produtos de fissão, a uma distância de 1.500 metros do ponto de liberação. A dose equivalente efetiva no corpo inteiro, H_{EF} , devida à radiação externa proveniente dos produtos de fissão liberados para a atmosfera, recebida no ponto de interesse, será a soma das doses recebida de cada radionuclídeo.

Radionuclídeo	χ/Q [s/m ³]	$\bar{E}_\gamma$ [MeV/des]	Q [Bq]	H_E [Sv]
Kr-83m	$3,67 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-3}$	$5,9 \times 10^{11}$	$3,81 \times 10^{-08}$
Kr-85m	$3,67 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-1}$	$5,6 \times 10^{11}$	$2,22E \times 10^{-06}$
Kr-85	$3,67 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-3}$	$5,9 \times 10^6$	$3,22 \times 10^{-13}$
Kr-87	$3,67 \times 10^{-4}$	$7,8 \times 10^{-1}$	$3,7 \times 10^{12}$	$7,16 \times 10^{-05}$
Kr-88	$3,67 \times 10^{-4}$	2,0	$2,4 \times 10^{12}$	$1,19 \times 10^{-04}$
Kr-89	$3,67 \times 10^{-4}$	1,6	$1,6 \times 10^{14}$	$6,35 \times 10^{-03}$
Xe-131m	$3,67 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^8$	$1,49 \times 10^{-10}$
Xe-133m	$3,67 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-2}$	$6,7 \times 10^9$	$6,82 \times 10^{-09}$
Xe-133	$3,67 \times 10^{-4}$	$4,6 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{11}$	$1,14 \times 10^{-07}$
Xe-135m	$3,67 \times 10^{-4}$	$4,3 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{12}$	$8,64 \times 10^{-06}$
Xe-135	$3,67 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-1}$	$1,3 \times 10^{12}$	$8,06 \times 10^{-06}$
Xe-137	$3,67 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-1}$	$1,8 \times 10^{14}$	$7,14 \times 10^{-04}$
Xe-138	$3,67 \times 10^{-4}$	1,1	$4,8 \times 10^{13}$	$1,31 \times 10^{-03}$
I-131	$3,67 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^{-1}$	$3,3 \times 10^{10}$	$3,11 \times 10^{-07}$
I-132	$3,67 \times 10^{-4}$	2,2	$4,1 \times 10^{12}$	$2,24 \times 10^{-04}$
I-133	$3,67 \times 10^{-4}$	$6,1 \times 10^{-1}$	$5,9 \times 10^{11}$	$8,93 \times 10^{-06}$
I-134	$3,67 \times 10^{-4}$	2,6	$1,7 \times 10^{13}$	$1,10 \times 10^{-03}$
I-135	$3,67 \times 10^{-4}$	1,5	$1,7 \times 10^{12}$	$6,33 \times 10^{-05}$
H_{EF}				$9,98 \times 10^{-3}$

Procede-se da mesma para o cálculo das doses para 2.500 e 3.500 metros.

Os resultados dos cálculos das doses equivalentes efetivas no corpo inteiro, H_{EF} , devida à radiação externa proveniente dos produtos de fissão liberados para a atmosfera, nos pontos de interesse, são apresentadas na tabela a seguir.

d_c [km]	H_{EF} [Sv]
1,5	$9,98 \times 10^{-3}$
2,5	$4,65 \times 10^{-3}$
3,5	$2,85 \times 10^{-3}$

- Dose equivalente efetiva total no corpo inteiro, H_{ET}

A dose equivalente efetiva total no corpo inteiro, H_{ET} , recebida nos pontos de interesse será dada pela soma das doses devida aos raios gama e nêutrons prontos mais a dose equivalente efetiva devida a imersão na nuvem de produtos de fissão. Estas doses são apresentadas na tabela a seguir.

d_c [km]	H_{ET} [Sv]
1,5	$9,98 \times 10^{-3}$
2,5	$4,65 \times 10^{-3}$
3,5	$2,85 \times 10^{-3}$

As conseqüências devidas às doses recebidas, de acordo com a Tabela 3.9, são:

d_c [km]	Dose [Sv]	Nº de pessoas	Efeito mais provável
1,5	$9,98 \times 10^{-3}$	1.000	nenhum efeito clínico detectável
2,5	$4,65 \times 10^{-3}$	1.000	nenhum efeito clínico detectável
3,5	$2,85 \times 10^{-3}$	1.000	nenhum efeito clínico detectável

Consequência do acidente envolvendo Exposição Externa de Pessoas à radiação ionizante:

- nenhum efeito clínico detectável.
- **Exposição interna de pessoas**

Dos produtos de fissão mais importantes, gerados num acidente de criticalidade, apenas os isótopos do iodo são absorvidos pelo corpo humano e se concentram na glândula tireóide. Estes isótopos são metabolizados em compostos orgânicos de iodo que podem permanecer no órgão um tempo longo o suficiente para poderem causar danos locais.

Como a glândula tireóide não é um órgão sensível aos efeitos agudos da radiação, ou seja, não existe um efeito determinístico, as consequências deste acidente não serão consideradas nesta análise.

Coluna 7P – Pessoas sob Ameaça (Classificação das Consequências)

A classificação das consequências para as pessoas é feita utilizando-se a Tabela 4.2, conforme apresentado a seguir.

Acidente	Consequência	Classe
Exposição externa de pessoas	Nenhum efeito clínico detectável	A

Coluna 7V - Velocidade de Detecção (Classificação das Consequências)

A classificação da velocidade de detecção dos acidentes é feita com o auxílio da Tabela 4.3, e é apresentado a seguir.

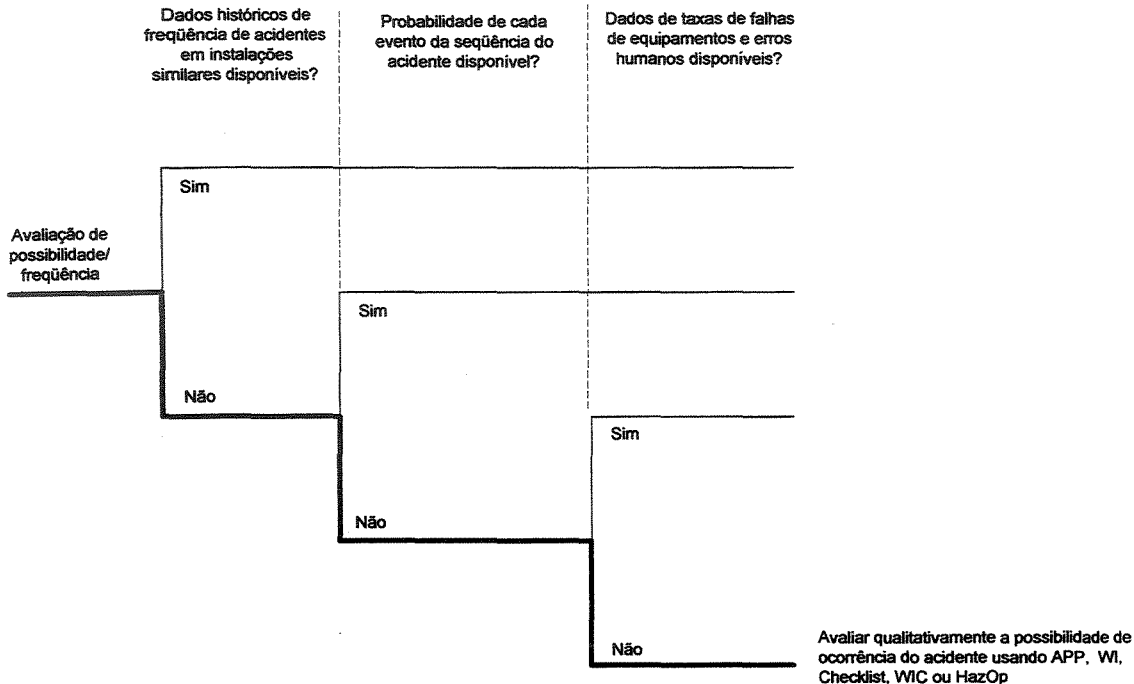
Acidente	Velocidade de detecção	Classe
Exposição externa de pessoas	Sem detecção	3

Coluna 8 (Frequência)

Neste caso exemplo será considerado que não existem disponíveis registros quantitativo da frequência de acidentes, da probabilidade de ocorrência de eventos e nem da

taxa de falhas de equipamentos em projetos similares ao caso em análise, que possam ser utilizados para estimar a frequência de ocorrência do acidente.

Para escolha da técnica mais adequada para estimar a possibilidade/frequência de ocorrência do acidente em análise utiliza-se a árvore de decisão apresentada na Figura 4.20, obtendo-se o caminho indicado pela linha em destaque na figura a seguir.



Para ocorrer o acidente de exposição externa de pessoas a raios gama, nêutrons e produtos de fissão é necessário que ocorra moderação ou perda da geometria segura.

Uma avaliação quantitativa da frequência dos eventos que possam levar a este acidente, ou seja, inundação, tornado, terremoto, lavagem inadequada da área de armazenamento ou armazenamento inadequado, é bastante complexa e está fora do escopo deste trabalho.

Uma análise dos 22 acidentes de criticalidade em instalações de processo registrados [26] mostra que 21 deles ocorreram em instalações com materiais físeis na forma de lama ou soluções, e um em instalação contendo material sólido na forma metálica. Nenhum acidente ocorreu enquanto o material fissil estava armazenado. Desta forma não se espera a ocorrência de tal acidente, durante a vida útil da instalação, no caso exemplo considerado.

A classificação da frequência de ocorrência do acidente analisado é feita utilizando-se a Tabela 4.5, conforme apresentado a seguir.

Acidente	Característica	Classe
Exposição externa de pessoas	Não esperado ocorrer durante a vida útil da instalação	2

Coluna 9 (Importância)

A importância do acidente, em termos de risco, depende da frequência de ocorrência do acidente e da sua consequência. A velocidade de detecção é um parâmetro que pode ser utilizado para priorização de riscos de mesma magnitude. A seguir são apresentadas as classes de consequências, frequência e velocidade de detecção para o acidente analisado.

Acidente	Classe		
	Consequência	Frequência	Velocidade de detecção
Exposição externa de pessoas	A	2	3

Com os dados apresentados acima e com auxílio da Figura 4.21, identifica-se o nível do risco dos acidentes analisados.

A classificação da importância é feita através da Tabela 4.6, obtendo-se:

Acidente	Nível do risco	Classe de importância
Exposição externa de pessoas	Trivial	I

Coluna 10 (Comentários)

Acidente	Classe de importância	Comentários
Exposição externa de pessoas	I	Nenhuma ação é requerida para redução do risco e nenhum registro documental precisa ser mantido.

A seguir são apresentadas a planilha simplificada, que serviu como orientação para orientação para a aplicação da metodologia desenvolvida, com o resumo da análise de riscos efetuada, e a matriz de risco correspondente.

Instalação, Área ou Sistema	Descrição das Operações	Situação de Risco	Cenário do Acidente			Pessoas sob Ameaça	Avaliação das Consequências	Classificação das Consequências		Freq	Imp.	Comentários
1	2	3	4			5	6	7		8	9	10
			EI	CE	TA			P	V			
- Área de armazenamento de UO_2 com enriquecimento de 5% em U^{235} .	- Manuseio e transporte de caixas metálicas contendo UO_2 com enriquecimento de 5% em U^{235} .	- 100.000 kg de UO_2 , - Armazenamento de pastilhas de UO_2 em caixas metálicas, - Substância sólida radioativa.	EI1	CE1 CE2 CE3 CE4 CE5	TA1	3.000 pessoas	Nenhum efeito clínico detectável	A	3	2	I	Nenhuma ação é requerida para redução do risco e nenhum registro documental precisa ser mantido.

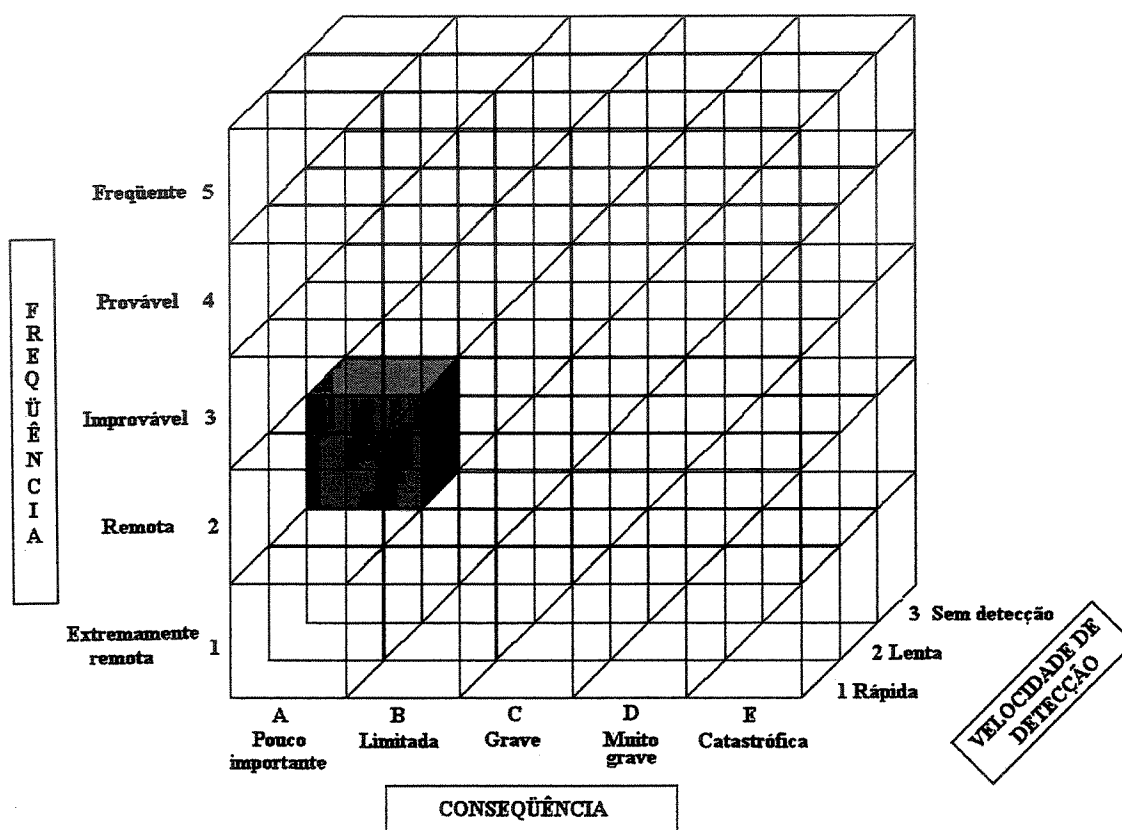
EI = Evento Iniciador CE = Causa do Evento Iniciador TA = Tipo do Acidente P = Pessoas sob Ameaça V = Velocidade de Detecção Freq = Frequência
Imp = Importância

EI1 = Moderação ou perda da geometria segura

CE1 = Tornado
CE2 = Inundação
CE3 = Terremoto

CE4 = Lavagem inadequada da área de armazenamento
CE5 = Armazenamento inadequado

TA1 = Exposição externa de pessoas



Legenda: ■ Exposição externa de pessoas

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi desenvolvida uma metodologia para a identificação dos riscos de acidentes e avaliação de suas consequências em instalações de processamento químico e nuclear.

Nesta metodologia a avaliação do risco é orientada pelo preenchimento de uma planilha desenvolvida tomando como base conceitos de Análise Preliminar de Perigos (APP), Análise de Modos de Falhas e Efeitos (AMFE) e metodologias para identificação de risco sugeridas pela United Nations Environment Programme – Industry and Environment [84]. Esta planilha auxilia na identificação do cenário do acidente e na avaliação da sua frequência e consequências. O processo é realizado através do uso de árvores de decisão que apontam os acidentes mais prováveis nos tipos de instalações consideradas.

É sugerida uma classificação de risco utilizando uma matriz de risco tridimensional que deve orientar e priorizar as ações a serem tomadas em relação a cada risco identificado.

Apesar da multidisciplinaridade das técnicas e conceitos para avaliação dos riscos e da imensa variedade de cenários possíveis de ocorrerem nas instalações analisadas, a metodologia desenvolvida fornece uma orientação sistemática bastante útil para uma abordagem geral dos riscos envolvidos em instalações complexas. Não foi encontrada na literatura metodologia com o alcance e aplicabilidade da desenvolvida neste trabalho.

A metodologia foi validada através de inúmeros testes, que abrangeram todas as seqüências de acidentes consideradas e, neste trabalho, foi apresentada sua aplicação a dois casos exemplos, adaptados da literatura, que abordaram acidentes envolvendo material inflamável, explosivo e radioativo. Foi desenvolvido o *software MAR - Metodologia para Análise de Riscos*, apresentado no Anexo II, utilizando DELPHI, versão 5.0, com a finalidade de sistematizar e automatizar a aplicação da metodologia, e que pode ser executado em ambiente Windows 98, ou superior, em computadores Pentium, ou superior.

Adicionalmente foram selecionadas técnicas qualitativas e quantitativas que devem ser utilizadas para identificação de riscos nas instalações de processamento químico e nuclear. São elas: Análise de Árvore de Eventos (AAE), Análise de Árvore de Falhas (AAF), Análise Preliminar de Perigos (APP), “*What-if*” (WI), Lista de Verificação

(“*Checklist*”), “*What-if/Checklist*” (WIC) e Estudo de Operabilidade e Riscos (HazOp). A seleção e utilização de cada uma das técnicas citadas dependem das informações disponíveis, da complexidade da instalação e da profundidade da análise. Foram também identificados os *softwares* mais empregados para a utilização destas técnicas.

Foram selecionados e adaptados modelos de cálculo para avaliação das consequências dos acidentes envolvendo materiais inflamáveis, explosivos, radioativos e tóxicos. Foram também identificados os *softwares* mais empregados para a avaliação das consequências.

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram identificados temas que estão fora do escopo proposto mas que refletem tanto no resultado de uma análise de riscos quanto na complementação da metodologia proposta.

Assim, sugere-se que trabalhos correlatos futuros abordem temas tais como:

- Desenvolvimento de modelos para avaliação de consequências de incêndio em nuvem de vapor, uma vez que o modelo disponível é excessivamente simplificado (item 3.4.7) não permitindo o uso de seus resultados para tomada de decisão;
- Desenvolvimento do parâmetro “velocidade de detecção”, utilizado na matriz de risco tridimensional sugerida (item 4.2), através de uma abordagem quantitativa;
- Estudo sobre os efeitos biológicos probabilísticos da radiação ionizante, visando avaliar outros danos às pessoas, além da probabilidade de mortes por câncer e
- Automatização da avaliação quantitativa das consequências dos acidentes identificados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Manual de orientação para a elaboração de estudos de análise de riscos.** São Paulo: 1994. 54p.
- [2] RISK WORLD. **Risk-related software**, 2000. Disponível em: <<http://riskworld.com/software/SW5S001.htm>>. Acesso em: 21/09/2000.
- [3] UNITED STATES. Environmental Protection Agency. **Non-EPA data bases and softwares.** Washington: 2000. Disponível em: <<http://www.epa.gov/swercepp/da-epds.html>>. Acesso em: 10/11/2000.
- [4] CICCIO, F. D; FANTAZZINI, M. L. **Gerência de riscos: Os riscos empresariais e a gerência de riscos.** Revista Proteção, 1998. (edição 94, 10 anos). CD-ROM.
- [5] SOUZA, E. A. **O treinamento industrial e a gerência de riscos: uma proposta de instrução programada.** 1995. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Escola de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [6] PORTO, M. F. S.; FREITAS, C. M.; MACHADO, J. M. H. **Grandes e graves.** Revista Proteção, 1998. (edição 94, 10 anos). CD-ROM.
- [7] DEPARTAMENT D'INTERIOR, DIRECCIÓ GENERAL D'EMERGÈNCIES I SEGURETAT CIVIL. **Protección civil: Qué es la protección civil.** Generalitat de catalunya: 2000. Disponível em: <<http://www.fut.es/~protciv/ewelcome.html>>. Acesso em: 18/11/2000
- [8] PINTO, F. C. **Técnicas e aplicações da análise da confiabilidade humana em instalações nucleares.** 1995. 193 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [9] VASCONCELOS, V. **Aplicação da metodologia da árvore de falhas na análise de risco em sistemas complexos.** 1984. 143p. Dissertação. (Mestrado

em Ciências e Técnicas Nucleares) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.

- [10] TECHNICA INTERNATIONAL WHAZAN (World Bank Hazard Analysis). **User guide and theory manual**. [S.l.]: 1988.
- [11] SENNE JR., M.; VASCONCELOS, V. **Análise de conseqüências de acidentes em instalações nucleares**. In: ENCONTRO DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 3, 1995. Águas de Lindóia. **Anais...** Belo Horizonte: CNEN/CDTN, 1995. v.2, p. 1061-1066.
- [12] CARSON, P. A.; MUMFORD, C. J. An analysis of incidents involving major hazards in the chemical industry. **Journal of Hazardous Materials**, v.3, issue 2, p. 149-165, 1979.
- [13] LEWIS, D. J. **Unconfined vapour-cloud explosions: historical perspective and predictive method based on incident records**. [S.l.]: The Energy Combustion Science, 1980.
- [14] PUBLISHING COMPANY. **Risck analysis of six potentially hazardous industrial objetet in the Rijimond area, a pilot study: a report to the Rijimond Public Authority**. [S.l.]: D. Reidel, 1982.
- [15] INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. **Manual de amônia**. Rio de Janeiro: IBP, 1977. 122p.
- [16] LEES, F. P. **Loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control**. 2.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996. 3 v.
- [17] BODEAU, D. J.; et al. **Data base for radiation events in the commercial nuclear fuel cycle 1950-1978**. Argonne: Argonne National Laboratory, 1981. (NUREG/CR-2429).
- [18] UNITED STATES. Nuclear Regulatory Commission. **Report to congress on abnormal occurrences**. Washington: 1995. (NUREG-0090)
- [19] UNITED STATES. Nuclear Regulatory Commission. **A preliminary evaluation of the economic risk cleanup of nuclear material licensee contamination incidents**. Washington: 1987. (NUREG/CR-4825)

- [20] UNITED STATES. Nuclear Regulatory Commission. **A regulatory analysis on emergency preparedness for fuel cycle and other radioactive materials licensees**. Washington: 1989. (NUREG-1.140)
- [21] INTERNATIONAL CONFERENCE ON URANIUM HEXAFLUORIDE HANDLING, 2, 1991, [S.l.]: **Proceedings...** Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1991.
- [22] OAK RIDGE GASEOUS DIFFUSION PLANT. In: CONFERENCE ON URANIUM HEXAFLUORIDE: SAFE HANDLING, PROCESSING, AND TRANSPORTING, 1988, Oak Ridge. **Proceedings...** Oak Ridge: United States Department of Energy, 1988.
- [23] INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. **Manual de ácido fluorídrico**. Rio de Janeiro: IBP, 1978.
- [24] UNITED STATES. Environmental Protection Agency. **Chemical accident histories and investigations**. Washington: 2000. Disponível em: <<http://www.epa.gov/swercepp/acc-his.html>>. Acesso em: 18/10/2000.
- [25] UNITED STATES. Nuclear Regulatory Commission. **NRC response to events: fuel cycle facilities: 1991-1996**. Washington: 2000. Disponível em: <<http://www.nrc.gov/NRC/AEOD/ER/fcf91-96.html>>. Acesso em: 10/10/2001.
- [26] LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY. **A review of criticality accidents**. Los Alamos: 2000. 158p. (LA – 13638)
- [27] BRASIE, W. C. The hazard potential of chemicals In: AMERICAN INSTITUTE CHEMICAL ENGINEERS. **Loss Prevention**. New York: AiChE, 1976. v.10, p. 135-140.
- [28] MISHIMA, J.; SCHWENDIGAN, L. C. **Fractional airborne release of uranium (representing plutonium) during the burning of contaminated wastes**. Richland: Battelle Pacific Northwest Labs, 1973. 20p. (BNWL-1730)
- [29] COELHO, C.P.; VANCONCELOS, V. **Explosões na usina de conversão e nas vias de transporte próximas ao complexo industrial de Resende: reavaliação**. Belo Horizonte: CDTN, 1981. (CDTN-DERL.PD-011/81)

- [30] UNITED STATES. Nuclear Regulatory Commission. **Evaluations for explosions postulated to occur on transportation routes near nuclear power plants**. Washington: 1976. (Regulatory Guide 1.91 - Rev. 1)
- [31] AES CALGARY PROJECT. **Quantitative risk assessment of proposed AES power plant**. Alberta: 2001. (Application to: the Alberta Energy and Utilities Board and Alberta Environment).
- [32] AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. Center for Process Safety. **Guidelines for evaluation the characteristics of vapour cloud explosions, flash fires, and BLEVEs**. New York, AIChE, 1994.
- [33] AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. Center for Process Safety. **Guidelines for chemical process quantitative risk analysis**. New York, AIChE, 2000.
- [34] GREGORY, J. J., HARPER, F. T. **Investigation of mass distribution in a stabilized plume for various lofting energies and meteorological conditions**. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2001. 57 p. (SAND 2001-1187)
- [35] UNITED STATES. Environmental Protection Agency. **Risk management program guidance for offsite consequence analysis**. Washington: Chemical Emergency Preparedness and Prevention Office – CEPPO, 1999. (EPA 550-b-99-009).
- [36] COMMITTEE FOR THE PREVENTION OF DISASTERS CAUSED BY DANGEROUS SUBSTANCES. **Methods for the determination of possible damage: to people and objects resulting from releases of hazardous materials**. 2 ed. Den Haag: The Netherlands Organization of Applied Scientific Research, 1992. (CPR 16G).
- [37] GREGORY, J. J., KELTNER, N. R.; MATA JR; R. Thermal measurements in large pool fires. **Journal of Heat Transfer**, vol. 111, p.446-454,1989.
- [38] BURGESS, D. S.; STRASSER A, GRUMER, J. Diffuse Burning of liquid fuels in open trays. **Fire Research Abstracts and Reviews**, v3, p. 177, 1961.

- [39] MUDAN, K. S. Fire hazard calculations for large open hydrocarbon fires. **SFPE Handbook of fire protection engineering**. Boston, MA: Society of Fire Protection Engineers, 1988.
- [40] BOSCH VANDEN, C. J. H.; WETERINGS R. A. P. M. (Eds.). **Methods for the calculation of physical effects: due to releases of hazardous materials (liquids and gases) "Yellow Book"**. 3 ed. Hague: Committee for the Prevention of Disasters, 1997. 2 v.
- [41] THOMAS, P. H.. **The size of flames from natural fires**. Proc. 9th International Symposium on combustion. Academic Press. New York. N.Y. p. 844— 859, 1963.
- [42] MUDAN, K. S.; CROCE, P. A **Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires**. Proc. Energy Combust Sci., vol. 10, no 1, p. 59-80, 1984.
- [43] KUMAR, SUNIL. Spreadsheet calculates critical flow. **Chemical Engineering**, v.109,n. 11, p. 62-67, Oct., 2002.
- [44] AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. Center for Process Safety. **Guidelines for use of vapor cloud dispersion models**. New York, AIChE, 1996.
- [45] SLADE, DAVID H. **Meteorology and atomic energy**. 1.ed. Air Resources Laboratoies, 1968.
- [46] MILLER, W.; CHARLES, M. Estimating radionuclide air concentration near building: a screening aproach. **Environmental Sciences**, p. 55-57, 1986.
- [47] NAZAROFF, W. W.; CASS, G. R. Mathematical modeling of chemically reactive pollutants in indoor air. **Environmental Science Technology**. v. 20, n. 9, p. 924-934, Sept.,1986.
- [48] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. Oxford, 1991. (ICRP publication 60)
- [49] SENNE JR., M. **Noções básicas sobre radiação ionizante e proteção radiológica**. Belo Horizonte: CDTN, 1999. (CDTN 854/99)

- [50] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **RBE for deterministic effects**. Oxford: 1989. (ICRP publication 58)
- [51] LAMARSH, J. R., BARATTA, A.J. **Introduction to nuclear engineering**. 3.ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [52] TAUHATA, L., et al. **Radioproteção e dosimetria**. Rio de Janeiro: CNEN/IRD, 1999. 180p.
- [53] UNITED STATES. Nuclear Regulatory Commission. **Assumptions used for evaluating the potencial radiological consequences of accidental nuclear criticality in a uranium fuel fabrication plant**. Washington: 1979. (Regulatory Guide 3.34 - Rev. 1)
- [54] UNITED STATES. Nuclear Regulatory Commission. **Nuclear Criticality Safety Standards for Fuels and Material Facilities**. Washington: 1998. (Regulatory Guide 3.71)
- [55] SENNE JR., M.; VASCONCELOS, V. **Análise de acidentes do reator TRIGA IPR-R1**. Belo Horizonte: CDTN, 1981. (CDTN-DERL PD-041/81)
- [56] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Report of the task group on reference man: anatomical, physiological and metabolic characteristics**. Oxford: 1975. (ICRP publication 23)
- [57] UNITED STATES. Nuclear Regulatory Commission. **Calculation of annual doses to man from routine releases for reactor effluents for purpose of evaluting compliance with 10 CFR Part 50, appendix I**. Washington: 1977. (Regulatory Guide 1.109 - Rev. 1)
- [58] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Limits for intakes of radionuclides by workers**. Oxford, 1982. (ICRP publication 30)
- [59] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: part 5 compilation of ingestion and inhalation dose coefficients**. Oxford, 1996. (ICRP publication 71)

- [60] BAKER, W. E., et al. **Workbook for predicting pressure wave and fragment effects of exploding propellant tanks and gas storage vessels**. Washington: NASA Scientific and Technical Informations Office, 1975. (NASA CR-134906)
- [61] PERRY, R. H.; GREEN, D. **Perry's chemical handbook**, 7 ed. New York: MacGraw-Hill, 1997.
- [62] EDMISTER, W. C., LEE, B. I. **Applied hydrocarbon thermodynamics**. 2 ed. Houston: Gulf Publishing Company, 1984.
- [63] KLETZ, T.A. Eliminating potential process hazards. **Chemical Engineering**, v. 92, n. 7, p. 48-68, Apr., 1985.
- [64] LANNOY, A.; GOBERT, T. Evaluations on hazards from industrial activities near nuclear power plants: deterministic and probabilistics studies. **Nuclear Engineering and Design**, v. 57, n., p. 207-214, Apr., 1980.
- [65] TIXIER, J., DUSSERRE, G., SALVI, O., GASTON, D. Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. **Journal of loss prevention in the process industries**, vol. 15, p. 221-303, 2002.
- [66] RISK ANALYSIS HOME PAGE. **Risk analysis methodologies**, 2000. Disponível em: <<http://home1.pacific.net.sg/~thk/>>. Acesso em: 24/01/2002.
- [67] WINTLE. J. B., et al. **Best practice for risk based inspection as a part of plant integrity management**. Norwich: Health and Safety Executive, 2001. 186 p.
- [68] HELMAN, H.; ANDERY, P. R. P. **Análise de falhas**: aplicação de métodos de FMEA e FTA. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Ottoni, 1995.
- [69] UNITED STATES. Nuclear Regulatory Commission. **Fault tree handbook**. Washington: 1981. (NUREG-0492)
- [70] SCAPIN, C. A. **Análise sistêmica de falhas**. Belo Horizonte: Desenvolvimento Gerencial, 1999.

- [71] CAYMAN BUSINESS SYSTEM. **Failure mode and effects analysis sample slides**. West Chester: 2001. Disponível em: <<http://www.qs9000.com/FMEA/>>. Acesso em: 09/11/2001
- [72] FANTAZZINI, M. L., **What-if/Checklist**: um procedimento eficaz na identificação e controle de riscos. IBGR. Boletim Técnico, n. 8, p. 1-7 /s.d./Edição especial.
- [73] LIMA, J. E. P. et al. **Planejamento de ações em emergências envolvendo transporte de produtos químicos perigosos**. In: ENCONTRO ÍBERO-AMERICANO DE UNIDADES AMBIENTAIS DO SETOR TRANSPORTE, 3, 1998, Florianópolis. 12 p. Disponível em <<http://200.180.3.8/iiiencontro/autores/P39/principal.hm>>. Acesso em: 30/01/2002.
- [74] LIMA, J. E. P., OLIVEIRA, L. F. S. **Gerenciamento de riscos na indústria petroquímica**. In: ECOLATINA 2001, 1, 2001, Belo Horizonte. 5 p. Disponível em: <http://www.ecolatina.com.br/br/artigos/riscos_ambientais/risc_amb_01.asp>. Acesso em: 30/01/2002.
- [75] UNITED STATES. Coast Guard. **Risk-based Decision-making Guidelines**. Washington: 2001. Disponível em: <<http://www.uscg.mil/hq/g-m/risk/e-guidelines/html/index.htm>>. Acesso em: 26/10/2001.
- [76] BLAZETEC CORPORATION. **Overview of ADORA (Atmospheric Dispersion of Reacting Agents)**. Cambridge: 1999. Disponível em: <<http://www.blazetech.com/summary..html>>. Acesso em: 10/11/2000
- [77] THERMDYNE TECHNOLOGIES. **Bleve incident simulator (BIS)**. Kingston, 1999. Disponível em: <<http://business.inkingston.com/thermdyne/>>. Acesso em: 10/11/2000.
- [78] ZANNETTI, P. **Air pollution modeling: theories, computational methods and available software**. 1.ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 443 p.
- [79] DNV – DET NORSKE VERITAS PHAST. **Getting started**. London: 2000.
- [80] UNITED STATES. Department of Commerce Techonology Administration. National Technical Information Service. **HGSYSTEM: dispersion models for**

- ideal gases (version 3.0)**. Springfield: 2001. Disponível em: <[http:// www. ntis. gov/fcpc/cpn7432.htm](http://www.ntis.gov/fcpc/cpn7432.htm)>. Acesso em: 25/01/2002.
- [81] NUCLEAR ENERGY AGENCY. **HGSYSTEMU F6, simulating dispersion due to atmospheric release of UF6**. Paris: 2001. Disponível em: <[http:// www. nea. fr/abs/html/ests1242.html](http://www.nea.fr/abs/html/ests1242.html)>. Acesso em: 25/01/2002.
- [82] UNITED STATES. Environmental Protection Agency. **Support center for regulatory air models** Washington: 2002. Disponível em: <[http://www. epa. gov/scram001/main.htm](http://www.epa.gov/scram001/main.htm)>. Acesso em: 28/02/2002.
- [83] KUNKEL, L.; DUNGEY, C. **User's manual for USAF toxic chemical dispersion model – AFTOX**, version 4.1, snt, 1993. 16p. (anexo ao software AFTOX).
- [84] UNITED NATIONS. **Hazard identification and evaluation in a local community**. Paris: . United Nations Environment Programme – Industry and Environment, 1998. (Technical Report N° 12).
- [85] CAPALDO, C.; GUERRERO, V.; ROZENFELD, H. **FMEA (Failure Model and Effect Analysis): conceitos básicos**, 1999, São Paulo, 6 p. Disponível em <<http://www.numa.org.br>>. Acesso em: 18/11/2002
- [86] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS8800: guide to occupational health and safety management systems**. London, 1996.
- [87] UNITED STATES. Nuclear Regulatory Commission. **Radiological assessment: a textbook on environmental dose analysis**. Washington: 1983. (NUREG-3332)
- [88] CEMBER, H. **Introduction to Health Physics**. New York: Pergamon Press, 1985.
- [89] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN-NE-3.01: Diretrizes básicas de radioproteção**. Rio de Janeiro: 1988.

ANEXO I

NOÇÕES BÁSICAS SOBRE OS EFEITOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE, CÁLCULO DE DOSE E FISSÃO NUCLEAR

1. Efeitos biológico da radiação ionizante

Existem duas formas do ser humano ser exposto à radiação:

Exposição Interna: Acontece quando fontes de radiação são introduzidas no corpo humano, por inalação, ingestão ou absorção através da pele.

Exposição externa: Acontece quando o corpo humano é colocado ao alcance das radiações ionizantes emitidas por fontes de radiação localizadas fora do corpo.

Em qualquer uma das formas de exposição citadas, a energia das radiações transferida aos tecidos vivos desencadeia reações físicas e químicas que podem resultar em modificações biológicas. Estas modificações biológicas podem acontecer tanto no indivíduo que foi exposto à radiação quanto nos descendentes deste indivíduo. Os efeitos da radiação ionizante no corpo humano podem ser classificados em [88]:

- Efeitos determinísticos

A maioria dos tecidos e órgãos não são afetados pela perda de um número substancial de células, mesmo porque as células estão continuamente morrendo e se reproduzindo. Entretanto, se este número de células que morrem for muito grande, ocorrerão danos ao organismo.

Este tipo de efeito, relacionado com a morte de células, é chamado determinístico ou não-estocástico, significando que ele fatalmente ocorrerá acima de um determinado valor de dose.

Quando uma pessoa recebe baixas doses de radiação o efeito determinístico é nulo. No entanto, acima de um determinado nível de dose, chamado limiar, o dano aparece e a gravidade aumenta rapidamente com a dose. São exemplos de efeitos determinísticos em tecidos específicos: catarata no cristalino do olho; lesões não cancerosas na pele; danos às células gonadais (testículos e ovários) levando à redução da fertilidade; redução da atividade da medula óssea hematopoética (formadora de sangue), resultando em deficiências hematológicas e imunológicas [88].

- Efeitos probabilísticos

Se as células irradiadas forem apenas modificadas, ao invés de mortas, o resultado é muito diferente do descrito anteriormente. As células resultantes das reproduções de células mutadas são, quase sempre, eliminadas ou isoladas pelas defesas do organismo, que as identifica como “corpos estranhos”. Se isto não ocorrer, após um longo período de latência, que pode chegar a dezenas de anos, estas células podem originar câncer [49].

A probabilidade de ocorrência de câncer, devido a baixas doses de radiação é aproximadamente proporcional à dose recebida e, provavelmente, sem limiar de dose; isto significa que, mesmo baixas doses de radiação podem provocar câncer, apesar de ser muito pequena a probabilidade. Já a gravidade do câncer não é influenciada pela dose. Este tipo de efeito é chamado probabilístico ou estocástico, significando “de natureza estatística ou probabilística”. Em outras palavras, pode-se prever *quantas* pessoas dentro de um grupo, irradiadas com uma determinada dose de radiação, irão morrer devido a cânceres radioinduzidos. De maneira alguma pode-se dizer *quais* serão estas pessoas [49].

Se o dano inicial ocorrer numa célula germinativa, nos testículos ou ovários, cuja função é transmitir informações genéticas para gerações posteriores, os efeitos, que podem ser de diferentes tipos, são chamados genéticos ou hereditários, por poderem se manifestar em gerações subseqüentes. Deve-se ressaltar, porém, que estes efeitos, apesar de ocorrerem comprovadamente em animais de laboratório, nunca foram observados na espécie humana, nem mesmo nos filhos e netos dos sobreviventes das bombas atômicas lançadas sobre o Japão, na segunda guerra mundial. Os efeitos observados nesta população são devidos à irradiação de embriões ou fetos, em mulheres grávidas à época [88].

- Efeitos no embrião ou no feto

Além dos efeitos não-estocásticos e estocásticos, já mencionados, devem também ser considerados os possíveis efeitos resultantes da irradiação do embrião ou do feto, durante a gravidez. Estudos realizados indicam que a irradiação nas duas primeiras semanas aumenta o risco de aborto espontâneo; neste caso, o mais provável é que a mulher nem fique sabendo que esteve grávida; a partir daí, e até o final do terceiro mês de gravidez, aumenta o risco de malformações, uma vez que é nesta fase que ocorre a organogênese, ou formação de órgãos; da metade do segundo mês até a metade do quinto mês, aumenta a probabilidade de redução do quociente de inteligência das crianças; finalmente, a irradiação

em qualquer época da gravidez pode provocar efeitos estocásticos (cânceres) na infância, adolescência ou mesmo na fase adulta do indivíduo [88].

2. Grandezas e unidades dosimétricas

Para que se possa medir a intensidade das radiações e correlacionar seus efeitos com sua intensidade, foi necessária a definição de algumas grandezas e unidades dosimétricas. Uma das propriedades básicas das radiações é a sua capacidade de transferir energia para o meio no qual propagam. Esta propriedade é utilizada na definição de das seguintes grandezas dosimétricas:

- Dose absorvida

A dose absorvida (D) é o quociente entre a energia transferida (E) pela radiação a uma determinada quantidade de material e a massa deste material (m), isto é [89]:

$$D = \frac{E}{m}$$

Portanto a unidade de dose absorvida, no sistema internacional de unidades, é J/kg, esta unidade recebe o nome de Gray (Gy).

O conceito de dose absorvida se aplica a qualquer meio material, isto é, pode-se referir a doses absorvidas no ar, na água, em metais, em tecidos do corpo humano, etc.

- Dose equivalente ou simplesmente dose

Para tipos e energias diferentes de radiações, um mesmo valor de dose absorvida pode produzir diferentes efeitos no tecido vivo. Assim, foi necessário criar uma nova grandeza que levasse em consideração estas diferenças; isto foi feito adotando-se um fator, denominado *fator de qualidade efetivo* (Q), que depende do tipo e da energia da radiação, e que deve ser multiplicado pela dose absorvida para se calcular a dose equivalente (H), isto é [89]:

$$H = D \times Q$$

Na Tabela A I.1 são fornecidos os valores médios de Q (fator de qualidade efetivo) para as radiações mais comuns [89].

Tabela A I.1 - Valores para *fatores de qualidade efetivo* [89]

Tipo de radiação	Q
Raios X, raios gama e partículas beta	1
Prótons e partículas com uma (1) unidade de carga e com massa de repouso maior que uma unidade de massa atômica e de energia desconhecida	10
Nêutrons de energia desconhecida	20
Partículas alfa e demais partículas com carga superior a uma (1) unidade de carga*	20

* unidade de carga é a carga do elétron

O fator de qualidade é normalizado, não possui unidade; portanto, a unidade de dose equivalente é a mesma da dose absorvida, isto é, J/kg. Entretanto, convencionou-se chamar esta unidade de sievert (Sv) quando se refere a doses equivalentes.

O conceito de dose equivalente se aplica somente a órgãos e tecidos do corpo humano, isto é, pode-se referir a doses equivalentes na tireóide, nos pulmões, na medula óssea, nas gônadas, etc., mas nunca a doses equivalentes no ar, na água, em metais, etc. Além disto, o fator de qualidade Q é definido para representar os riscos relativos dos diversos tipos de radiação somente na faixa de baixas doses, isto é, em situações normais de rotina, e nunca em situações de acidente, nas quais poderiam ocorrer doses suficientemente altas para produzir efeitos determinísticos. Assim, a dose equivalente e a dose equivalente efetiva (definida a seguir) só podem ser utilizadas para avaliação de efeitos probabilísticos da radiação (cânceres e efeitos hereditários) [49].

- Dose equivalente efetiva

Os vários órgãos e tecidos do corpo humano apresentam diferentes radiosensibilidades, sendo uns mais resistentes às radiações do que outros. Além disto, os diferentes órgãos do corpo têm importâncias diferentes para o organismo como um todo; assim, é perfeitamente possível uma pessoa sobreviver sem o apêndice ou até mesmo sem a glândula tireóide, mas não sem o fígado ou sem os pulmões [49].

Quando se leva esses fatos em consideração, vê-se que a grandeza dose equivalente, anteriormente definida, permite que se compare os riscos de indivíduos que tenham o mesmo órgão, por exemplo o pulmão, irradiado; entretanto, devido às diferentes radiosensibilidades e importâncias, não se poderia comparar os riscos de pessoas irradiadas nos pulmões com aqueles de pessoas irradiadas na tireóide, usando apenas a dose equivalente [49]. Definem-se, então, fatores de ponderação (w_T) para diversos tecidos e órgãos (Tabela A 1.2) que devem ser multiplicados pela dose equivalente para se calcular a dose equivalente efetiva, (H_E), grandeza esta que permite que se compare os riscos para diferentes órgãos irradiados [89]. Logo:

$$H_E = w_T \times H_T$$

onde:

H_E = dose equivalente efetiva;

w_T = fator de ponderação do órgão ou tecido T irradiado e

H_T = dose equivalente no órgão ou tecido T irradiado.

Caso mais de um órgão seja irradiado simultaneamente, a dose equivalente efetiva será igual à soma de vários produtos do tipo $w_T \times H_T$, cada produto correspondendo a um órgão. Assim, para vários órgãos irradiados ter-se-ia:

$$H_E = \sum_T (w_T \times H_T).$$

A unidade de dose equivalente efetiva é também o sievert (Sv). A dose equivalente efetiva é um indicador do risco para o corpo inteiro quando um ou mais órgãos são irradiados.

Tabela A I.2 - Fatores de ponderação para órgãos ou tecidos [89]

Órgão	w_T
Gônadas	0,25
Mama	0,15
Medula óssea eritropoética	0,12
Pulmão	0,12
Tireóide	0,03
Osso (superfície)	0,03
Restante do corpo *	0,06 (por órgão)

- * a) considerar, no máximo, 5 (cinco) órgãos ou tecidos que receberam dose mais elevada;
- b) admitir o $w_T = 0,06$ para cada um dos cinco órgãos ou tecidos;
- c) o sistema gastro-intestinal é considerado formado de quatro órgãos: estômago, intestino delgado, intestino grosso superior e intestino grosso inferior;
- d) a pele, o cristalino dos olhos e as extremidades não são considerados como órgãos do restante do corpo humano ($w_T = 0$);
- e) nos casos em que seja necessário levar em conta a pele para efeitos estocásticos, como por exemplo, irradiação da pele do corpo por irradiação beta de energia baixa, considerar $w_T = 0,01$.

3. Fissão nuclear

A palavra fissão significa partição, quebra, divisão. Fissão nuclear é a quebra de um núcleo atômico pesado e instável através de bombardeamento desse núcleo com nêutrons moderados, originando dois núcleos atômicos médios, mais 2 ou 3 nêutrons e uma quantidade de energia enorme. Enrico Fermi, em 1934, bombardeando núcleos com nêutrons de velocidade moderada, observou que os núcleos bombardeados capturavam os nêutrons. Pouco tempo depois, após o bombardeamento de urânio com nêutrons moderados, a equipe do cientista alemão Otto Hahn constatou a presença de átomos de bário, vindo a concluir que, após o bombardeio, núcleos instáveis de urânio, partiam-se praticamente ao meio. Como os nêutrons não possuem carga elétrica, não sofrem desvio de sua trajetória, devido ao campo eletromagnético do átomo. Estando muito acelerado, atravessariam completamente o átomo; estando a uma velocidade muito lenta, seriam rebatidos; mas com velocidade moderada, ficam retidos, e o novo núcleo formado, instável, sofre desintegração posterior com emissão de partículas beta. Somente alguns átomos são capazes de sofrer fissão, entre eles o urânio-235 e o plutônio-239. A enorme quantidade de

energia produzida numa fissão nuclear provém da transformação da matéria em energia. Na fissão nuclear há uma significativa perda de massa, isto é, a massa dos produtos é menor que a massa dos reagentes. Tal possibilidade está expressa na famosa equação de Einsten: $E=mc^2$, onde E é energia, m massa e c a velocidade da luz no vácuo. No processo de fissão, cerca de 87,5% da energia liberada aparece na forma de energia cinética dos produtos da fissão e cerca de 12,5% como energia eletromagnética.

O bombardeamento do núcleo de um átomo com um nêutron causa a fissão do núcleo desse átomo e a liberação de 2 ou 3 novos nêutrons. A reação em cadeia, ou *criticalidade*, só ocorre acima de determinada massa de urânio. A mesma ocorre com velocidade máxima quando a amostra do material físsil é grande suficiente para a maioria dos nêutrons emitidos ser capturados por outros núcleos. Portanto, a reação em cadeia se mantém, se a massa do material é superior a um certo valor característico chamado massa crítica. Para o urânio-235 a massa crítica é de aproximadamente 3,25 Kg [52].

Alguns elementos químicos, como o boro na forma de ácido bórico ou de metal, e o cádmio em barras metálicas, têm a propriedade de absorver nêutrons, porque seus núcleos podem conter ainda um número de nêutrons superior ao existente em seu estado natural, resultando na formação de isótopos de boro e de cádmio. A grande aplicação do controle da reação de fissão nuclear em cadeia é nos Reatores Nucleares, para geração de energia elétrica.

ANEXO II

DESCRIÇÃO DO *SOFTWARE* MAR - METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS

1. Descrição geral

O *software* MAR - *Metodologia para Avaliação de Riscos* foi desenvolvido com a finalidade de sistematizar e automatizar a aplicação da metodologia desenvolvida para análise de riscos de instalações de processamento químico e nuclear elaborada neste trabalho. O diagrama de blocos simplificado do *software* é apresentado na Figura AII.1. É constituído basicamente por módulos de orientação para o preenchimento dos campos da planilha e facilidades de edição de gráficos, tabelas e textos (diagrama de estrutura hierárquica, árvores de decisão, matriz de risco, tabelas de classificação de frequência, consequência, casos exemplos e modelos de cálculo).

Os principais módulos orientam a descrição da instalação e da operação, do cenário do acidente, a avaliação do risco (frequência x consequência) e a apresentação dos resultados (planilha preenchida, matriz de risco e importância)

2. Como utilizar

O *software* MAR - *Metodologia para Avaliação de Riscos* apresenta em sua tela inicial a planilha que orienta a aplicação da metodologia (Figura AII.2). Para iniciar uma análise de riscos “clica-se” na coluna 1 – *Instalação, Área ou Sistema*, e é aberta a tela referente a esta coluna (Figura AII.3), na qual existe um campo para a descrição das informações referentes à instalação em análise, e duas “janelas”. Uma delas contém as instruções sobre o tipo de informação que deve ser fornecida pelo usuário e outra um caso exemplo do campo de descrição preenchido

Após o preenchimento da tela correspondente à coluna 1 “clica-se” no botão PLANILHA, para voltar à planilha inicial, e então “clica-se” na coluna 2 para iniciar o preenchimento da mesma conforme descrito para a coluna 1, e assim sucessivamente.

Após o preenchimento de todas as telas o *software* fornecerá a planilha preenchida, a matriz de risco e a importância de cada acidente analisado.

3. Visão geral

As Figuras AII.4 e AII.5 apresentam, respectivamente exemplos de telas com Diagrama de Estrutura Hierárquica e Árvore de Decisão para a identificação dos eventos iniciadores dos acidentes e dos tipos de acidentes que devem ser analisados. Para cada acidente o *software* orienta tanto no cálculo da consequência (seleção de modelos) quanto na avaliação da frequência.

As Figuras AII-6 e AII-7 apresentam as telas do software, a partir das quais são orientados os cálculos e classificações da consequência, velocidade de detecção e frequência do acidente. A partir destas classificações matriz de risco e sua consequente classificação em trivial, tolerável, moderado, substancial, ou intolerável (Figuras AII-8 e AII-9, respectivamente).

A Figura AII-10 apresenta a tela onde devem ser acrescentados os comentários referente às ações que devem ser tomadas na instalação analisada, face aos riscos estimados. O *software* permite gerar comentários padrão acionando o botão indicado para esta finalidade.

A janela “Arquivos” apresentada na Figura AII-11 mostra a possibilidade de salvar os dados referentes à instalação analisada, carregar dados previamente gravados e imprimir relatório sobre a avaliação.

4. Informações técnicas

- Plataforma: Windows 98 ou superior.
- Espaço necessário em disco rígido: 20 MB
- Memória requerida: 64 MB RAM
- Desenvolvido em DELPHI, versão 5.0.

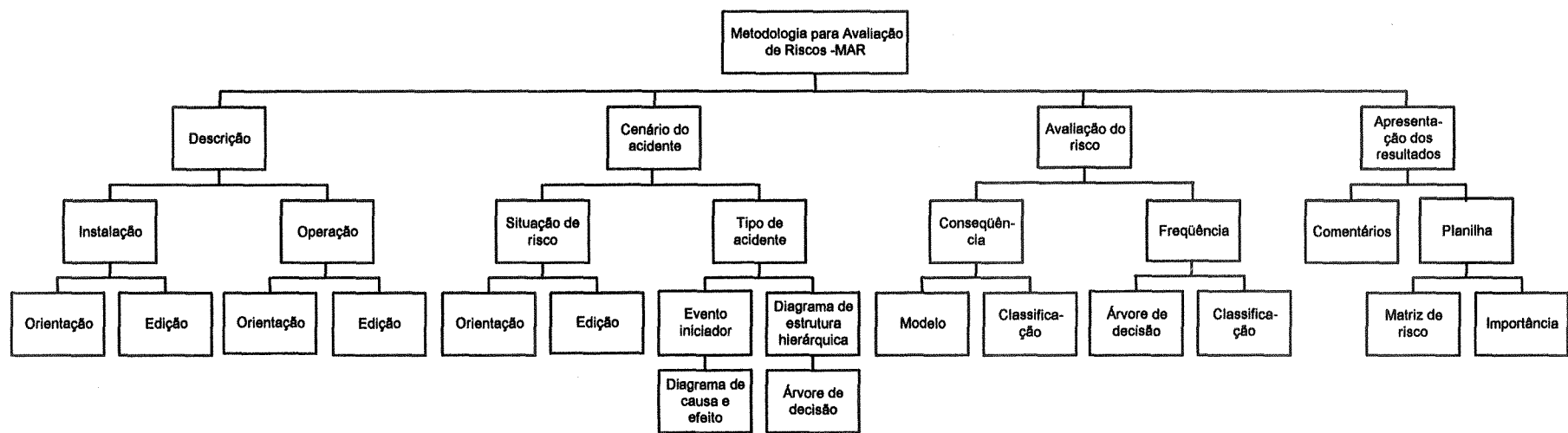


Figura AII.1 – Diagrama de blocos simplificado do *software* Metodologia para Avaliação de Riscos - MAR

MAR - Metodologia de Avaliação de Riscos

Instalação, Área ou Sistema

Planilha simplificada para orientação da aplicação da metodologia para avaliação de riscos.

Instalação, Área ou Sistema 1	Descrição das Operações 2	Situação de Risco 3	Cenário do Acidente 4			Pessoas sob Ameaça 5	Avaliação das Consequências 6	Classificação das Consequências 7		Freq 8	Imp 9	Comentários 10
			EI	CE	TA			P	V			

EI = Evento Iniciador CE = Causa do Evento Iniciador TA = Tipo do acidente P = Pessoas sob Ameaça V = Velocidade de detecção Freq = Frequência
 Imp = Importância

Figura AII.2 – Tela inicial do *software* MAR - Metodologia para Avaliação de Riscos

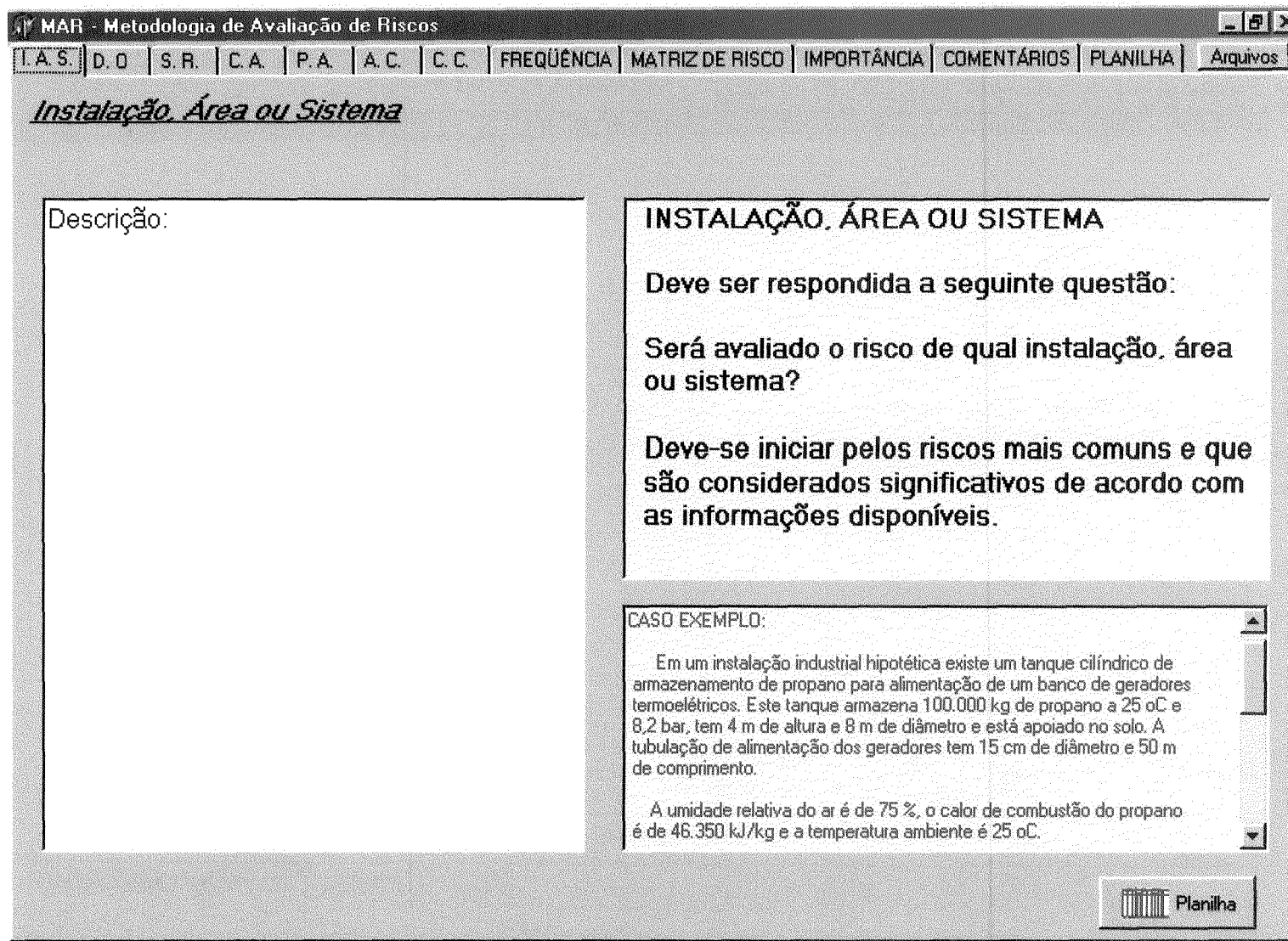


Figura AII.3 – Tela referente à coluna 1 – Instalação, Área ou Sistema, do *software* MAR - Metodologia para Avaliação de Riscos

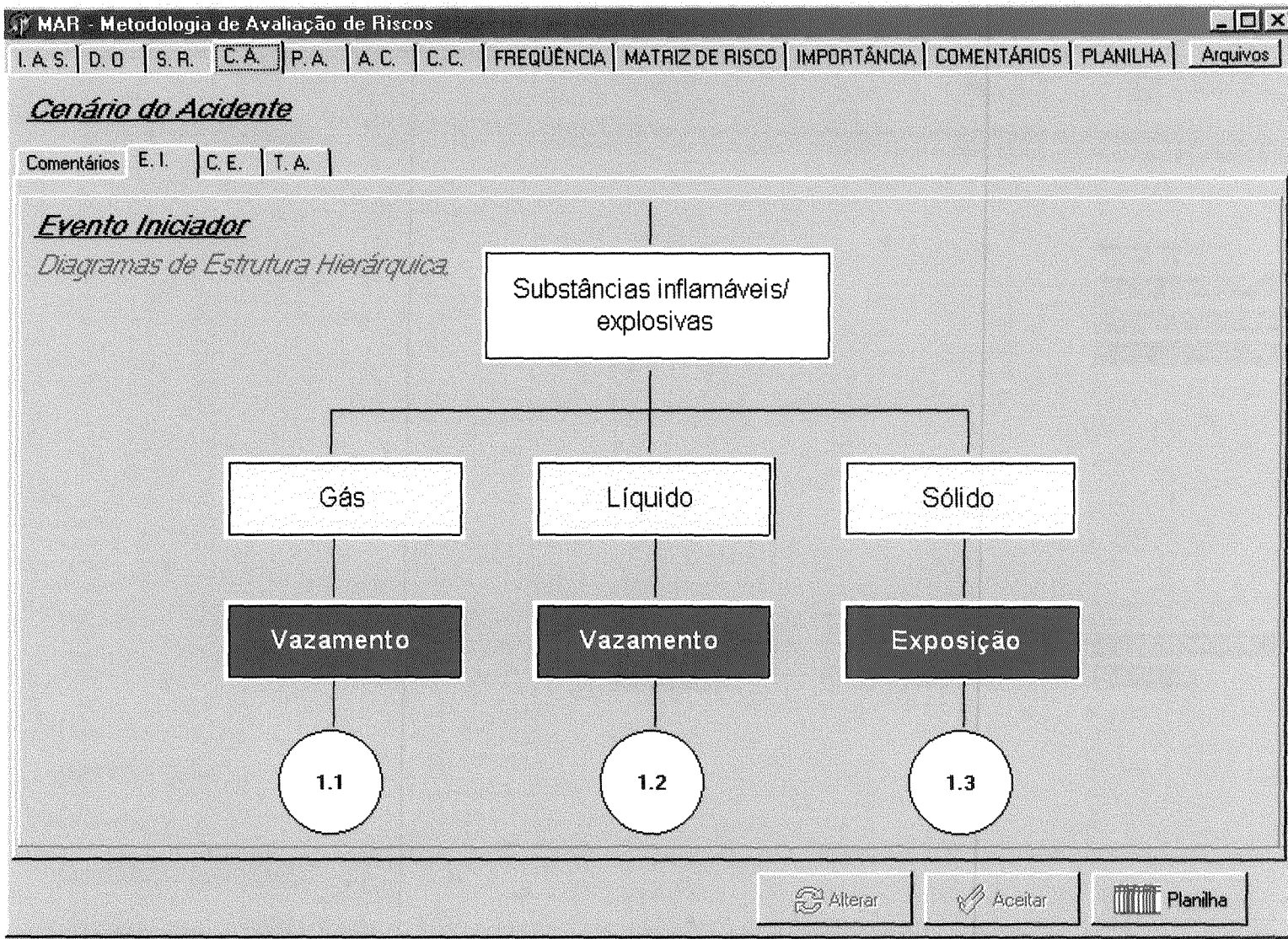


Figura AII.4 – Tela referente à coluna 4EI – Evento Iniciador, do *software* MAR - Metodologia para Avaliação de Riscos

MAR - Metodologia de Avaliação de Riscos

I. A. S. | D. O. | S. R. | C. A. | P. A. | A. C. | C. C. | FREQUÊNCIA | MATRIZ DE RISCO | IMPORTÂNCIA | COMENTÁRIOS | PLANILHA | Arquivos

Cenário do Acidente

Comentários | E. I. | C. E. | T. A. |

Tipo do Acidente

Árvore de Decisão

Vazamento de gás inflamável/explosivo

1.1

☒ Vaz. contínuo	☐ Gás liquefeito sob refrigeração ☒ Gás liquefeito sob pressão ☐ Gás pressurizado	☒ Ignição imediata ☒ Ignição retardada ☒ Sem ignição	Jato de Fogo Incêndio Nuvem Vapor Dispersão de Gás
☒ Vaz. instantâneo	☐ Gás liquefeito sob refrigeração ☒ Gás liquefeito sob pressão ☐ Gás pressurizado	☒ Ignição imediata ☒ Ignição retardada ☒ Sem ignição	BLEVE / Bola de Fogo Explosão Nuvem Vapor Incêndio Nuvem Vapor Dispersão de Gás

Alterar

Aceitar

Planilha

Figura AII.5 – Tela referente à coluna 4TA – Tipo do Acidente, do *software* MAR - Metodologia para Avaliação de Riscos

MAR - Metodologia de Avaliação de Riscos

I.A.S. | D.D. | S.R. | C.A. | P.A. | A.C. | C.C. | FREQUÊNCIA | MATRIZ DE RISCO | IMPORTÂNCIA | COMENTÁRIOS | PLANILHA | Arquivos

Classificação das Conseqüências

Comentários | Tabelas 4.2 e 4.3 | P&V

Acidente envolvendo "Jato de Fogo" devido a vazamento contínuo de gás inflamável/explosivo liquefeito sob pressão com ignição imediata.

Acidente envolvendo "Incêndio de Nuvem de Vapor" devido a vazamento contínuo de gás inflamável/explosivo liquefeito sob pressão com ignição retardada.

Acidente envolvendo "BLEVE / Bola de Fogo" devido a vazamento instantâneo de gás inflamável/explosivo liquefeito sob pressão com ignição imediata.

Acidente envolvendo "Explosão de Nuvem de Vapor" devido a vazamento instantâneo de gás inflamável/explosivo liquefeito sob pressão com ignição retardada com explosão.

Acidente envolvendo "Incêndio de Nuvem de Vapor" devido a vazamento instantâneo de gás inflamável/explosivo liquefeito sob pressão com ignição retardada sem explosão.

CLASSE DO ACIDENTE

☒ A - Pouco Importante

☐ B - Limitada

☐ C - Grave

☐ D - Muito Grave

☐ E - Catastrófica

VELOCIDADE DE DETECÇÃO

☐ 1 - Rápida

☐ 2 - Lenta

☒ 3 - Sem detecção

Aceitar/Alterar/Gravar

Planilha

Figura AII.6 – Tela referente à coluna 7P e 7V– Classificação das Conseqüências, do *software* MAR - Metodologia para Avaliação de Riscos

MAR - Metodologia de Avaliação de Riscos

I. A. S. | D. O. | S. R. | C. A. | P. A. | A. C. | C. C. | **FREQUÊNCIA** | MATRIZ DE RISCO | IMPORTÂNCIA | COMENTÁRIOS | PLANILHA | Arquivos

Frequência

Comentários | Árvore de Decisão | Tabelas 4.4 e 4.5. | **Dados da Frequência**

Acidente envolvendo "Jato de Fogo" devido a vazamento contínuo de gás inflamável/explosivo liquefeito sob pressão com ignição imediata.	CLASSE DA FREQUÊNCIA ☐ 1 - Extremamente Remota ☐ 2 - Remota ☐ 3 - Improvável ☐ 4 - Provável ☒ 5 - Frequente
Acidente envolvendo "Incêndio de Nuvem de Vapor" devido a vazamento contínuo de gás inflamável/explosivo liquefeito sob pressão com ignição retardada.	
Acidente envolvendo "BLEVE / Bola de Fogo" devido a vazamento instantâneo de gás inflamável/explosivo liquefeito sob pressão com ignição imediata.	
Acidente envolvendo "Explosão de Nuvem de Vapor" devido a vazamento instantâneo de gás inflamável/explosivo liquefeito sob pressão com ignição retardada com explosão.	
Acidente envolvendo "Incêndio de Nuvem de Vapor" devido a vazamento instantâneo de gás inflamável/explosivo liquefeito sob pressão com ignição retardada sem explosão.	

Aceitar/Alterar/Gravar

Planilha

Figura AII.7 – Tela referente à coluna 8 – Frequência, do *software* MAR - Metodologia para Avaliação de Riscos

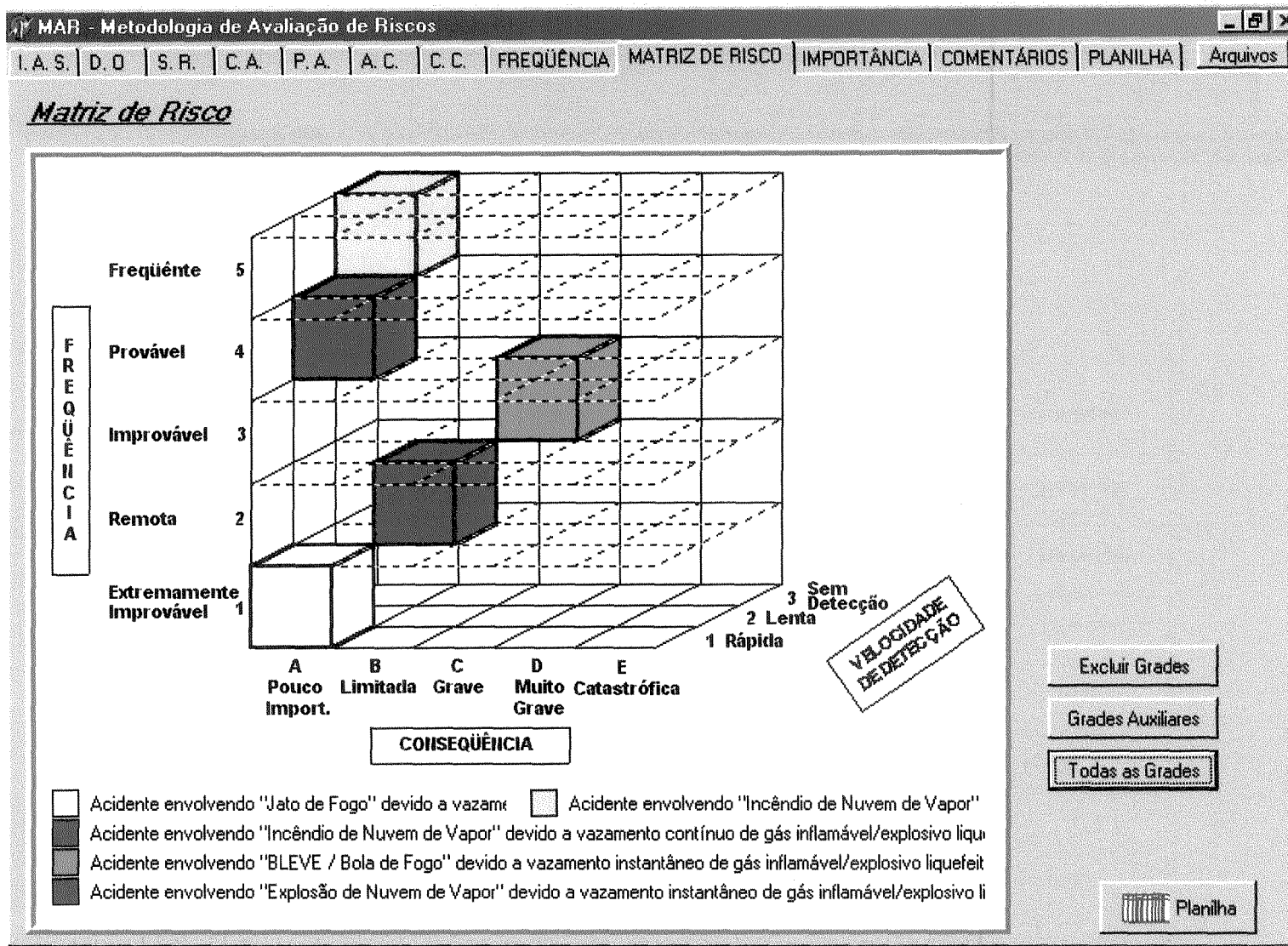


Figura AII.8 – Tela referente à Matriz de Risco, do *software* MAR - Metodologia para Avaliação de Riscos

MAR - Metodologia de Avaliação de Riscos

I. A. S. | D. O. | S. R. | C. A. | P. A. | A. C. | C. C. | FREQUÊNCIA | MATRIZ DE RISCO | **IMPORTÂNCIA** | COMENTÁRIOS | PLANILHA | Arquivos

Importância

Comentários | Classificação da Importância

Acidente	Descrição do Acidente	Classe	N. de Risco
1	Acidente envolvendo "Jato de Fogo" devido a vazamento contínuo de gás inflamável/explosivo liquefeito sob pressão com ignição imediata.	I	Trivial
2	Acidente envolvendo "Incêndio de Nuvem de Vapor" devido a vazamento contínuo de gás inflamável/explosivo liquefeito sob pressão com ignição retardada.	II	Tolerável
3	Acidente envolvendo "BLEVE / Bola de Fogo" devido a vazamento instantâneo de gás inflamável/explosivo liquefeito sob pressão com ignição imediata.	III	Moderado
4	Acidente envolvendo "Explosão de Nuvem de Vapor" devido a vazamento instantâneo de gás inflamável/explosivo liquefeito sob pressão com ignição retardada com explosão.	III	Moderado
5	Acidente envolvendo "Incêndio de Nuvem de Vapor" devido a vazamento instantâneo de gás inflamável/explosivo liquefeito sob pressão com ignição retardada sem explosão.	III	Moderado

Planilha

Figura AII.9 – Tela referente à coluna 9 – Importância, do *software* MAR - Metodologia para Avaliação de Riscos

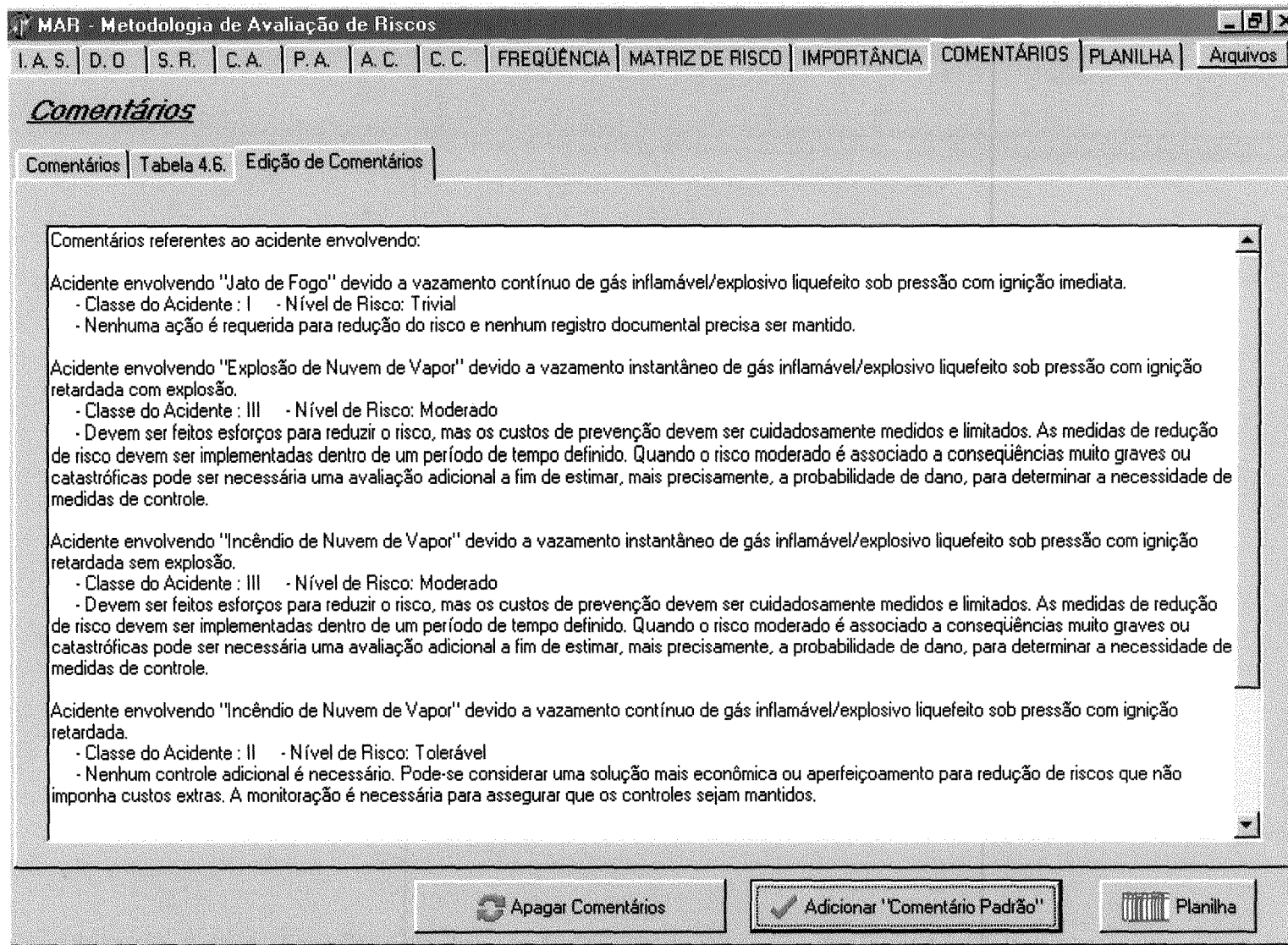


Figura AII.10 – Tela referente à coluna 10 – Comentários, do *software* MAR - Metodologia para Avaliação de Riscos

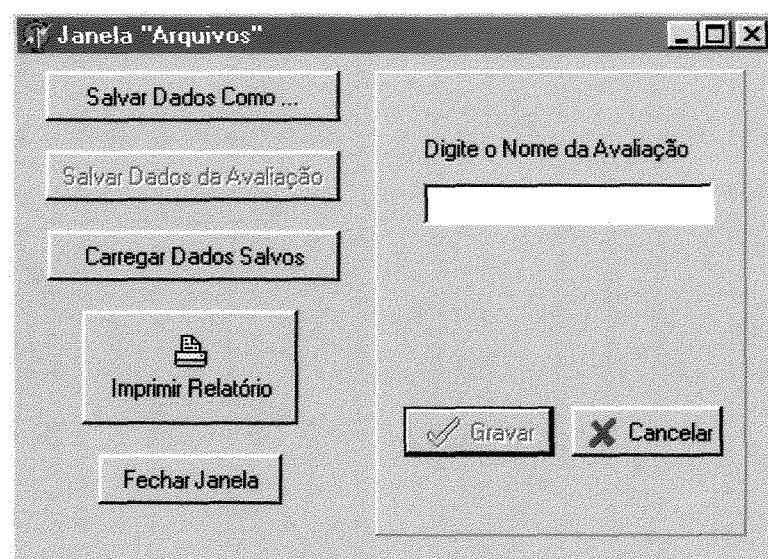


Figura AII.11 – Janela “Arquivos”, do *software* MAR - Metodologia para Avaliação de Riscos