

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

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

**ANÁLISE DE RISCOS E AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL
EM UMA INSTALAÇÃO DE PROCESSAMENTO QUÍMICO**

Autor: Maristhela Passoni de Araújo Marin

Orientador: Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi

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

Campinas - São Paulo

Setembro de 2005

UNIDADE	OC
Nº CHAMADA	17/11/11
	1338a
V	EX
TOMBO BC/	66568
PROC.	16-P-20086-09
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	11,00
DATA	13/12/05
Nº CPD	

lido id 374660

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

M338a Marin, Maristhela Passoni de Araujo
Análise de riscos e avaliação de impacto ambiental
em uma instalação de processamento químico /
Maristhela Passoni de Araújo Marin.--Campinas, SP:
[s.n.], 2004.

Orientador: Elias Basile Tambourgi.
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Meio ambiente. 2. Avaliação de riscos. 3.
Processos químicos. 4. Impacto ambiental. I.
Tambourgi, Elias Basile. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III.
Título.

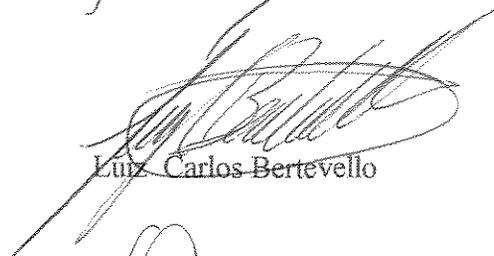
Tese de doutorado , defendida por Maristhela Passoni de Araújo Marin ,em
17 de novembro de 2004 , e aprovada pela banca constituída pelos seguintes doutores



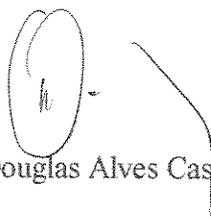
Elias Basile Tambourgi



Ailton Pinto Alves Filho



Luiz Carlos Bertevello



Douglas Alves Cassiano



Flavio Vasconcelos da Silva

141876300

Esta versão corresponde à final da Tese de Doutorado defendida por Maristhela Passoni de Araújo Marin em 17 de novembro de 2004.

A handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, overlapping loops and strokes, positioned above the name of the supervisor.

Prof Dr Elias Basile Tambourgi- orientador

Dedicatória

Ao meu marido Vainer, à minha filha Ana Luiza e à minha mãe Ivalda, com carinho.

À meu pai, in memoriam, Valcir.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi pela orientação, amizade e constante incentivo.

À UNICAMP, pelos cursos de pós graduação.

À reitoria do Centro Universitário da FEI e em particular ao Departamento de Engenharia Química, por colaborar e apoiar o constante aperfeiçoamento de seus professores.

Aos amigos Luiz Carlos Bertevello e Douglas Alves Cassiano, pela amizade, pelo auxílio e solicitude durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus familiares pelo carinho, compreensão e paciência.

À todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para realização deste trabalho.

Acima de tudo a Deus.

ANÁLISE DE RISCOS E AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL EM UMA INSTALAÇÃO DE PROCESSAMENTO QUÍMICO

RESUMO

Os acidentes industriais ocorridos nos últimos anos, em particular na década de 80, aliados à problemas ambientais existentes, 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.

Existe uma tendência atual muito forte para que as análises de risco quantitativas, consideradas uma ferramenta útil na identificação de perigos, passem a ser realizadas com mais freqüência nas partes consideradas mais críticas dos sistemas industriais com riscos de acidentes com conseqüências ambientais.

Neste trabalho é apresentado um método para análise de risco em instalações de processamento químico, que consiste basicamente nas seguintes etapas: descrição e estudo do sistema, análise e identificação dos perigos, identificação dos cenários acidentais, quantificação das conseqüências dos cenários e caracterização do risco.

Para ilustrar a aplicação do método foi escolhida uma instalação de produção de hexafluoreto de urânio. Os principais perigos identificados nessa planta foram: incêndios, explosões, vazamentos de substâncias químicas e contaminação do solo por problemas na manta de impermeabilização da bacia de retenção de rejeitos.

Quantitativamente foi analisado o impacto ambiental de casos de liberação de hexafluoreto de urânio (UF_6) para diferentes cenários, considerando três classes de estabilidade atmosférica: Pasquill C, Pasquill D e Pasquill F. Verificou-se que o impacto que atinge amplas áreas externas à planta corresponde à condição de estabilidade atmosférica F.

Palavras Chave: análise de riscos, impacto ambiental, avaliação ambiental, acidente

RISK ANALYSIS AND ENVIRONMENTAL IMPACT ANALYSIS IN A CHEMICAL PROCESSING FACILITY

ABSTRACT

The industrial accidents which have occurred in the last few years, particularly in the 80's, allied to environmental problems, contributed in a significant way to draw the attention of the government, of the industry and of the whole society to mechanisms for preventing events that could affect people's safety and environment quality.

Nowadays there is a strong trend towards the quantitative risk analysis, considered an useful tool in hazard identification, to be more frequently used in the most critical areas of industrial systems with accident risk and environmental consequences.

The present work provides a method of risk analysis in chemical processing facilities, which consists primarily of the following steps: description and study of the system, hazard analysis and identification, identification of the accidental scenarios, calculation of the consequences of the scenarios and risk characterization.

To illustrate the application of the method, an uranium hexafluoride production facility was selected. The main hazards identified were: fire, explosion, spill of toxic chemical substances and ground contamination due to problems in the waterproof blanket of the waste contention bund.

Some cases of environmental impact due to uranium hexafluoride (UF_6) release were quantitatively analyzed for different scenarios, considering three categories of atmospheric stability: Pasquill C, Pasquill D and Pasquill F. It was found that the impact that reached a great external area around the plant corresponded to the condition of atmospheric stability F.

Key words: risk analysis, environmental impact, environmental analysis, accident

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS	XIV
Capítulo 1: INTRODUÇÃO	1
Capítulo 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Aspectos e Impactos Ambientais	4
2.1.1 Conceituação	4
2.1.2 Ferramentas para a Identificação de Impactos Ambientais	6
2.1.3 Conceitos de Perigo e Risco	10
2.1.4 Acidentes Potenciais em Instalações de Processamento Químico e Nuclear	11
2.2 Análise de Riscos	14
2.2.1 Técnicas Disponíveis de Análise de Riscos	16
2.2.1.1 Métodos Utilizados na Análise de Riscos	17
2.2.2 Análise Histórica de Acidentes	24
2.2.3 Efeitos da Exposição a Substâncias Tóxicas	25
2.2.3.1 Limites de Tolerância	26
2.3 Avaliação de Conseqüências de Eventos Indesejáveis e Priorização dos Impactos Ambientais	29
2.3.1 Avaliação de Conseqüências	29
2.3.1.1 Impactos Sobre a Saúde Humana	30
2.3.1.2 Impactos Sobre o Meio Ambiente	31
2.3.1.3 Impactos Programáticos	31
2.3.2 Priorização dos Impactos Ambientais	34
2.4 Gerenciamento dos Riscos	38
Capítulo 3: METODOLOGIA	40
3.1 Procedimento para Avaliação de Riscos	40
3.2 Parâmetros Utilizados no Presente Trabalho	49
Capítulo 4: ESTUDO DE CASO: PLANTA DE PURIFICAÇÃO E CONVERSÃO DE URÂNIO POR EXTRAÇÃO COM SOLVENTE	56

4.1	Introdução	50
4.2	Descrição da Instalação	50
4.2.1	Generalidades	50
4.2.2	Layout da Usina	51
4.2.2.1	Edificações	51
4.3	Descrição do Processo	55
4.3.1	Preparação da Alimentação	55
4.3.2	Dissolução e Digestão	56
4.3.3	Extração com Solvente	56
4.3.4	Denitração – Calcinação	57
4.3.5	Redução do Trióxido de Urânio à Dióxido de Urânio	59
4.3.6	Hidrofluoração	59
4.3.7	Fluoração e Coleta	60
4.3.8	Produção de Flúor	61
4.4	Processamento de Efluentes e Sistemas de Gerenciamento de Rejeitos	64
4.4.1	Processamento de Efluentes	64
4.4.1.1	Efluentes Líquidos	64
4.4.1.2	Efluentes Gasosos	66
4.4.2	Gerenciamento de Rejeitos	69
4.4.2.1	Rejeitos Radioativos Líquidos	69
4.4.2.2	Rejeitos Radioativos Sólidos	69
4.4.2.3	Rejeitos não Radioativos Sólidos	69
4.5	Inventário dos Materiais	70
Capítulo 5: APLICAÇÃO DO MÉTODO		75
5.1	Introdução	75
5.2	Divisão da Planta em Áreas, Identificação dos Componentes, Modos de Falhas e Inventário de Materiais	75
5.3	Identificação dos Perigos	81
5.3.1	Principais Eventos Indesejáveis	82
5.4	Classificação dos Casos de Liberação	83
5.4.1	Liberação dos Casos de Liberação de UF ₆	83
5.4.1.1	Determinação dos Termos Fontes	84

	XI
5.4.1.2 Análise de Conseqüências	84
5.5 Resultados das Análises de Conseqüências	86
5.5.1 Análise Quantitativa da Liberação de UF ₆	86
5.5.1.1 Avaliação Quantitativa do Caso B	88
5.5.1.1.1 Análise do Caso B1	89
5.5.1.1.2 Análise do Caso B2	90
5.5.1.1.3 Análise do Caso B3	91
5.5.1.2 Avaliação Quantitativa do Caso C	95
5.5.1.3 Construção da Matriz de Risco	98
5.5.1.4 Resumo dos Casos Analisados	99
Capítulo 6: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	103
6.1 Conclusões	103
6.2 Sugestões para Próximos Trabalhos	104
Capítulo 7: REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	106
ANEXO I: Propriedades do UF ₆	112
ANEXOII: Propriedades do ácido fluorídrico (HF)	118
ANEXO III: Propriedades da amônia (NH ₃)	120
ANEXO IV: Propriedades do ácido nítrico (HNO ₃)	123
ANEXO V: Análise Histórica de Acidentes	126
ANEXO VI: Modelo de Dispersão Atmosférica Utilizada para o Cálculo de liberação de UF ₆	137
ANEXO VII: Flutuações Horizontal e vertical da Direção do Vento	139
ANEXO VIII: Programa Computacional CONV_ACI	142
ANEXO IX: Estabilidade Atmosférica	143

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Matriz de Risco	37
Figura 3.1 a	Fases para elaboração de um estudo de análise de risco	44
Figura 3.1 b	Fases para análise de risco no caso de liberação de substância	45
Figura 3.2	Perigos associados a uma instalação	46
Figura 3.3	Árvore de definição dos casos de falha	47
Figura 3.4	Árvore de eventos de liberação de gás tóxico	48
Figura 4.1	Diagrama de blocos – Produção de UF ₆	53
Figura 4.2	Layout da instalação	54
Figura 4.3	Extração por solvente	58
Figura 4.4	Fluoração	62
Figura 4.5	Produção de Flúor	63
Figura 4.6	Diagrama de fluxo do sistema de tratamento de efluentes líquidos	65
Figura 4.7	Diagrama de fluxo do sistema de tratamento de efluentes gasosos	67
Figura 4.8	Esquema do processo geral de gerenciamento de rejeitos	71
Figura 5.1	Concentração de HF (mg/m ³) em função da distância para as classes de estabilidade atmosférica Pasquill D e F– Caso B1	92
Figura 5.2	Incorporação de urânio (U) (mg) em função da distância para as classes de estabilidade atmosférica Pasquill D e F– Caso B1	92
Figura 5.3	Concentração de HF (mg/m ³) em função da distância para as classes de estabilidade atmosférica Pasquill D e F – Caso B2	93
Figura 5.4	Incorporação de urânio (U) (mg) em função da distância para as classes de estabilidade atmosférica Pasquill D e F– Caso B2	93
Figura 5.5	Concentração de HF (mg/m ³) em função da distância para as classes de estabilidade atmosférica Pasquill D e F – Caso B3	94

Figura 5.6	Incorporação de urânio (U) (mg) em função da distância para as classes de estabilidade atmosférica Pasquill D e F – Caso B3	94
Figura 5.7	Concentração de HF (mg/m ³) em função da distância para as classes de estabilidade atmosférica Pasquill C, D e F - Caso C	97
Figura 5.8	Incorporação de urânio (U) (mg) em função da distância para as classes de estabilidade atmosférica Pasquill C, D e F – Caso C	97
Figura 5.9	Matriz de Matriz de isco para liberações de UF ₆	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Impactos sobre a saúde: conseqüências radiológicas	32
Tabela 2.2	Impactos sobre a saúde: conseqüências toxicológicas	32
Tabela 2.3	Valores que definem grupos para urânio solúvel (U) e para o HF	32
Tabela 2.4	Parâmetros recomendados pela (WSRC, 1994) na determinação dos grupos em ordem hierárquica	33
Tabela 2.5	Impactos sobre o meio ambiente	33
Tabela 2.6	Impactos devidos a prejuízos financeiros	34
Tabela 2.7	Impactos sobre a operação da planta	34
Tabela 2.8	Categorias de gravidade	36
Tabela 2.9	Níveis de freqüência ou probabilidade de ocorrência	37
Tabela 4.1	Fluxo diário de material radioativo	72
Tabela 4.2	Fluxo diário de material não radioativo	72
Tabela 4.3	Efluentes não radioativos	73
Tabela 4.4	Rejeitos sólidos e líquidos	74
Tabela 5.1	Resumo da avaliação dos casos de liberação de UF ₆	102
Tabela I.1	Propriedades físicas do UF ₆	113
Tabela I.2	Efeitos adversos à saúde devido à inalação de urânio (U)	115
Tabela I.3:	Efeito da inalação de ácido fluorídrico (HF) em animais	116
Tabela I.4:	Concentração de ácido fluorídrico (HF) equivalente ao valor do IDLH	116
Tabela I.5:	Critério para classificação de liberação de UF ₆	117
Tabela II.1:	Principais propriedades físicas do HF	118
Tabela III.1:	Propriedades físicas da amônia anidra	120

		XV
Tabela III.2:	Dados de toxicidade da amônia	122
Tabela III.3:	Efeitos fisiológicos da amônia	122
Tabela IV.1:	Propriedades físicas de soluções de HNO ₃	123
Tabela V.1:	Acidentes ocorridos no mundo, envolvendo UF ₆ , UO ₂ , UO ₂ F ₂ e HF	126
Tabela V.2:	Alguns acidentes ocorridos com amônia	131
Tabela V.3:	Acidentes investigados pela EPA	134
Tabela VII.1	Valores de K em função da classe de estabilidade atmosférica	139
Tabela VII.2:	Valores das constantes para se determinar σ_z	140
Tabela IX.1	Categorias de estabilidade atmosférica proposta por Pasquill	144

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Hoje, a questão ambiental é um dos assuntos que mais tem atraído a tenção das pessoas, pela valorização que se dá à qualidade de vida e pela percepção de que as conseqüências do descaso com o meio ambiente têm conduzido a situações críticas para a própria sobrevivência da humanidade a longo prazo. Verifica-se que, a partir da revolução industrial, ou seja, muito pouco tempo atrás em termos históricos, comparando-se com a presença da vida humana na Terra, que o nível de poluentes jogados na atmosfera, nas águas e no solo, tem crescido exponencialmente, atingindo limites que não permitem mais a aceitação dos antigos procedimentos de “diluir e dispersar”. O esgotamento de recursos naturais, incluindo-se a própria água, tem levado a sérias preocupações, sobretudo por se verificar que o aumento populacional continua expressivo e sem controle, prevendo-se a falta desses recursos para as futuras gerações.

Aliado a esses problemas ambientais, 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. Isto tem se tornado mais importante atualmente com o conceito de Atuação Responsável em uso crescente nas empresas, principalmente do setor químico, que passaram a utilizar as normas ISO 14000 (Sistema de Gestão Ambiental), BS 8800 (Diretrizes para Sistemas de Gerenciamento da Segurança e Saúde Ocupacional), AS 8000 (Responsabilidade Social) e OSHAS 18000 (Sistemas de Gestão da Segurança e Saúde Ocupacional).

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 de impacto ambiental e de riscos associados a outras atividades industriais, em especial nas áreas de petróleo, química e petroquímica.

No Brasil, a Resolução nº1, 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. A realização de análise de riscos e de estudos de confiabilidade das plantas (instalações) industriais 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 potenciais passou a ser contemplada no processo de licenciamento (CETESB, 1994a). Da mesma forma, a realização de análise de riscos têm se mostrado importante na avaliação de instalações já em operação, porque permitem que os impactos ambientais em potencial sejam avaliados e gerenciados a contento.

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 programas de computador empregados para agilizar ou viabilizar sua utilização (RISK WORD, 2000; EPA, 2000a).

Pretende-se neste trabalho propor e aplicar um método de análise de risco quantitativo à uma instalação de processamento químico e avaliar os impactos de toxicidade humana por exposição e os impactos ambientais gerados em condições anormais de operação.

Este trabalho está estruturado em seis capítulos e oito anexos.

No Capítulo 2 são apresentados inicialmente os conceitos de efeitos e impactos ambientais e as ferramentas para identificação destes impactos. É apresentado também uma visão geral dos setores de uma indústria que oferecem riscos potenciais para ocorrências de acidentes e descrições de técnicas de análise de riscos e impacto ambiental.

No Capítulo 3 será descrito a metodologia utilizada de análise de riscos e os parâmetros de avaliação de conseqüências aplicados.

No Capítulo 4 é apresentada a descrição da planta de produção, a qual é utilizada como referência para a aplicação do método de análise de risco.

No Capítulo 5 é realizado um estudo de caso, para liberações de UF₆.

No Capítulo 6 é apresentado a conclusão do estudo da planta e feitas sugestões para trabalhos futuros e no Capítulo 7 são referenciadas as bibliografias utilizadas.

Nos Anexos I, II, III e IV são descritas as propriedades físicas, químicas e toxicológicas do UF₆, HF, NH₃ e HNO₃ respectivamente.

No Anexo V é apresentada uma análise histórica de acidentes de casos de liberação envolvendo as substâncias químicas de interesse neste trabalho.

No Anexo VI é descrito o modelo de dispersão atmosférica utilizado para o cálculo de liberação de UF₆. A determinação do σ_y e σ_z (flutuações horizontal e vertical) é apresentada no anexo VII.

No Anexo VIII é descrito o programa computacional CONV_ACI, utilizado para calcular a concentração de HF e a incorporação de urânio em função da distância, resultante da liberação de UF₆.

No Anexo IX é descrito as classes de estabilidade atmosférica de acordo com o modelo de dispersão de Pasquill.

CAPITULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Aspectos e Impactos Ambientais

2.1.1 – Conceituação

Aspectos ambientais são todos elementos das atividades de uma organização (processos), seus produtos ou serviços, que podem interagir com o meio ambiente. Como exemplo de aspectos ambientais em um produto tem-se: matéria prima, consumo de água e energia, embalagem utilizada, emissão de efluentes, etc.

Impactos ambientais são quaisquer mudanças no meio ambiente que ocorrem como resultado das atividades de uma organização. A idéia de impactos ambientais é quase sempre associada à geração de eventos indesejáveis, ou seja, agressões ao meio ambiente. O conceito de “efeitos ambientais” (utilizado na norma BS 7.750), por sua vez, é o de qualquer conseqüência direta ou indireta das atividades, produtos e serviços da organização sobre o ambiente, sejam eles adversos ou benéficos.

A norma ISO 14.001 define que a organização deve estabelecer e manter procedimentos para identificar os aspectos ambientais de suas atividades, produtos ou serviços que possam por ela ser controlados e sobre os quais presume-se que ela tenha influência, a fim de determinar aqueles que tenham ou possam ter impacto significativo sobre o ambiente.

A identificação dos aspectos e impactos ambientais é importante sobretudo para a realização da avaliação de desempenho ambiental da organização. O projeto da norma ISO 14.031 – Avaliação do Desempenho Ambiental – Diretrizes Gerais, define desempenho ambiental como sendo “o conjunto de resultados alcançados com a gestão dos aspectos ambientais da organização”. Essa avaliação é, na realidade uma ferramenta gerencial para auxiliar a identificar e avaliar, com realismo e objetividade, se os processos produtivos, produtos e serviços estão de acordo com os padrões estabelecidos pela alta administração na Política Ambiental, legislação ou outros documentos e compromissos assumidos pela

empresa. A avaliação feita inicialmente, deve ser depois repetida ao longo do desenrolar das atividades da empresa com a coleta de dados, sua análise e realização de registros, com o propósito de bem conhecer o problema e permitir fixar objetivos e metas realistas, dentro de um processo de melhoria e aperfeiçoamento contínuos.

Deve ser preparada uma lista com todos os aspectos ambientais identificados e associados a impactos, com o propósito de fornecer subsídios à realização de uma lista de prioridades à solução ou mitigação desses impactos (redução das conseqüências).

Os principais problemas ambientais atuais podem ser divididos em três grandes categorias (MOURA, 2002):

- **Problemas globais:** são aqueles que afetam toda a humanidade, ou cuja amplitude de conseqüências é suficientemente grande para ser considerada como global, afetando a vida na Terra. São eles: destruição da camada de ozônio, resíduos de pesticidas em alimentos, efeito estufa, destruição de florestas e biotecnologia.
- **Problemas regionais:** afetam uma região geográfica razoavelmente bem definida. Entre esses problemas podem ser citados: locais de despejo de resíduos sólidos (lixões ativos), locais abandonados de despejos de resíduos sólidos, poluição da água por resíduos industriais, despejo de óleo, ocorrência de acidentes com usinas nucleares, acidentes industriais com liberação de poluentes, radiação proveniente de resíduos nucleares, poluição do ar por fábricas, vazamento de tanques para o subsolo, contaminação da água do mar na costa, poluição da água devido à agricultura, poluição da água por estações de tratamento de esgotos, poluição do ar por veículos, chuva ácida, poluição da água por esgotos de cidades e despejos de lixos não perigosos.
- **Problemas locais:** afetam o local de instalação da empresa e suas vizinhanças imediatas. Entre estes problemas são citados: exposição de trabalhadores a produtos químicos tóxicos, resíduos sólidos, risco de pesticidas para trabalhadores do campo, poluição do ar no interior das residências e radiação por raios X.

Os tipos de problemas citados (globais, regionais ou locais) são, quase sempre, excessivamente genéricos para serem utilizados diretamente na solução de um problema específico das empresas. Nos casos em que se quer melhorar o desempenho ambiental da

instalação, será necessário entrar em profundidade na identificação dos elementos poluentes ou resíduos envolvidos.

2.1.2 – Ferramentas para a Identificação de Impactos Ambientais

Devido ao estabelecimento de legislação cada vez mais restritivas quanto a qualidade de produtos e à segurança industrial e ambiental está havendo uma crescente utilização de métodos para a avaliação dos *Aspectos e Impactos Ambientais* no desenvolvimento e na operação de processos químicos.

BAUER e MACIEL (1999) publicaram um trabalho cujo objetivo foi apresentar uma revisão das metodologias existentes na literatura que auxiliam na identificação, assim como apontar as metodologias que são propostas para a minimização de rejeitos. As metodologias revisadas e citadas no trabalho são:

“PINCH ANALYSIS”

Uma das primeiras metodologias propostas, surgiu visando promover a *Integração de Processos*, mais especificamente a *Integração Energética*, baseada na “Pinch Technology”. A aplicação inicial envolvia o “Thermal Pinch Point” (LINNHOFF et al., 1982) e visava a geração da Rede de Trocadores de Calor ótima para o processo. Este conceito foi estendido, criando o “Mass Pinch Point”, com o objetivo da síntese da Rede de Trocas de Massa ótima para o processo, isto é, a rede de processos de separação que tivesse o menor custo e que atendesse restrições quanto aos resíduos gerados.

Esta metodologia tem sido aplicada para redução do consumo de água em diversas situações a partir das alternativas de reutilização direta destes resíduos em outras etapas do processo, regeneração por tratamento parcial para a remoção dos contaminantes e posterior regeneração com posterior reciclo para a etapa onde os resíduos foram gerados.

“HIERARCHICAL DECISION PROCEDURE”

Essa metodologia (DOUGLAS,1992), inicialmente proposta como Procedimento Hierárquico de Decisão, visa a identificação e resolução de problemas potenciais de poluição nos estágios iniciais do desenvolvimento de um processo, conforme a seguinte seqüência:

Nível 1	Informação de Entrada: tipo de problema
Nível 2	Estrutura de Entrada – Saída do Fluxograma
Nível 3	Estrutura de Reciclo do Fluxograma
Nível 4	Especificação do Sistema de Separação
4a	Estrutura Geral: separação de fases
4b	Sistema de recuperação de vapor
4c	Sistema de recuperação de líquidos
4d	Sistema de recuperação de sólido
Nível 5	Integração Energética
Nível 6	Avaliação de Alternativas
Nível 7	Análise de Flexibilidade e Controle
Nível 8	Análise de Segurança

Este procedimento sistemático permite identificar alternativas para o processo em desenvolvimento, tornando-o menos poluente.

“LIFE CYCLE ASSESSMENT”

A *Análise do Ciclo de Vida* faz parte do conjunto de normas ISO 14.000 e tem sido empregada em alguns estudos de Impacto Ambiental. Esta metodologia foi proposta visando a quantificação do impacto ambiental em todo ciclo de vida de um produto, abrangendo a extração e preparação das matérias-primas, processamento, tratamento dos resíduos gerados, transporte e distribuição do produto, utilização / reutilização / reciclagem / disposição final do produto. A aplicação desta metodologia compreende três etapas : 1) Definição dos objetivos, limites do estudo e escolha da unidade funcional; 2) Realização do inventário de entradas e saídas de energia e materiais relevantes para o sistema em estudo,

3) Avaliação do impacto ambiental associado às entradas e saídas de energia e materiais ou avaliação comparativa de produtos ou processos: avalia os impactos devidos às emissões identificadas e ao consumo de recursos naturais e interpreta os resultados da avaliação de impacto com a finalidade de implantar melhorias no produto ou processo.

Um dos pontos importantes desta metodologia é a consideração do impacto ambiental dos resíduos associados a disponibilização das matéria-primas e de outros insumos para o processo. Outro ponto interessante é a preocupação com a quantificação do impacto ambiental associado às diferentes correntes envolvidas no ciclo de vida do produto, ao invés da computação de quantidades de contaminantes emitidos.

“INHERENTLY SAFER PROCESSES”

O conceito de *Plantas Inerentemente Mais Seguras* (KLETZ, 1985a), vem sendo cada vez mais divulgado e associado à metodologia da *Análise do Ciclo de Vida*. Esta metodologia está baseada em quatro estratégias: *Minimizar* (usar menores quantidades de substâncias perigosas); *Substituir* (trocar uma substância por outra menos perigosa); *Moderar* (usar condições de processo menos perigoso) e *Simplificar* (eliminar complexidade desnecessária e tornar os erros de operação menos prováveis). Entretanto, esta metodologia é implementada através de uma forma eminentemente qualitativa e associada à uma análise mais global envolvendo outros fatores (segurança, custos, operacionalidade, entre outros).

ALGORITMO “WAR”

Uma das metodologias para quantificar a geração de resíduos proposta era baseada no balanço geral de poluição de um processo (HILALY e SIKDAR, 1994). O algoritmo resultante foi denominado WAR (Waste Reduction) e em sua versão inicial tinha como objetivo avaliar a geração de resíduos e fornecer opções para redução destes resíduos. Numa primeira versão o algoritmo WAR considerava o impacto ambiental de todos resíduos como sendo igual.

Na nova versão deste algoritmo foi introduzido o conceito de balanço de *Impacto Ambiental Potencial* (PEI – Potencial Environmental Impact) (MALLICK et al., 1996). Esta

metodologia era baseada em balanços de massa e energia e utilizava dois tipos de índices: o primeiro tipo era utilizado para medir a *geração de Impacto Ambiental Potencial* dentro do processo e o segundo tipo era utilizado para medir o *Impacto Ambiental Potencial* emitido pelo processo. As categorias de *Impacto Ambiental Potencial* consideradas foram: *Potencial de Toxicidade Humana por Ingestão*, *Potencial de Toxicidade Humana por Exposição*, *potencial de Toxicidade Aquática*, *Potencial de Toxicidade Terrestre*, *Potencial de Aquecimento Global*, *Potencial de Redução da Camada de Ozônio*, *Potencial de Acidificação* e *Potencial de Oxidação Fotoquímica*.

METODOLOGIA “MEIM”

Nesta metodologia (STEFANIS et al., 1995) para *Minimização do Impacto Ambiental*, baseada no conceito de *Análise do Ciclo de Vida*, o impacto ambiental é computado a partir de seis índices ambientais: 1) *Poluição Aérea*; 2) *Poluição Líquida*; 3) *Poluição Sólida*; 4) *Aquecimento Global*; 5) *Oxidação Fotoquímica* e 6) *Redução da Camada de Ozônio*. Como resultado, cada poluente teria um vetor de impacto ambiental com seis valores. Esta metodologia foi aplicada para análise de emissões não rotineiras. Nesta metodologia é considerado para índices de poluição aérea e líquida o conceito de volumes críticos, isto é, calcula-se os volumes de ar e água necessários para diluir as emissões gasosas e líquidas, respectivamente, até os limites impostos pela legislação.

METODOLOGIAS RELACIONADAS COM SEGURANÇA DE PROCESSO

A pesquisa em segurança de processos químicos vem se intensificando ao longo das últimas décadas, principalmente com o auxílio de técnicas de Inteligência Artificial utilizada na detecção e diagnóstico de falhas.

As metodologias mais tradicionais para análise de segurança são baseadas fortemente na análise qualitativa e no conhecimento de especialistas para identificar os perigos associados a um processo. As metodologias mais recentes têm como proposição abordagens quantitativas, pois através de cálculos, chega-se a uma determinada “probabilidade” de ocorrência de um acidente ou falha, diminuindo um pouco a subjetividade que existe na análise apenas qualitativa. A partir daí, o processo se limita a

identificar se essa probabilidade é aceitável e, não o sendo, realizar modificações no projeto que levem a uma redução da probabilidade até um nível aceitável.

2.1.3 - Conceitos de Perigo e de Risco

a) Perigo

Perigo é uma circunstância que prenuncia um mal para alguém ou para alguma coisa (MOURA, 2002). O perigo é, portanto, uma característica inerente a uma substância, instalação, atividade ou procedimento, que representa um potencial de causar danos a pessoas ou instalações.

b) Risco

O risco reflete a incerteza associada a um perigo, com um evento imaginário ou com possibilidade de acontecer no futuro, que cause uma redução de segurança. É a probabilidade de perda ou danos em pessoas, sistemas e equipamentos ou ao meio ambiente em um determinado período de tempo, como resultado de uma situação de perigo. O risco é função da probabilidade ou da frequência de ocorrência de um acidente e de um dado tipo de dano resultante do acidente, ou seja, a magnitude das conseqüências (PORTO et al., 1998; DEPARTMENT D'INTERIOR, 2000).

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. (DEPARTMENT D'INTERIOR, 2000).

- **Riscos Tecnológicos**

São aqueles associados à tecnologia, tais como: riscos químicos, risco nuclear, transporte de produtos perigosos, etc. (DEPARTMENT D'INTERIOR, 2000).

- **Riscos Humanos**

São aqueles associados aos seres humanos, tais como: omissão na execução de uma tarefa ou de passos desta, erros de controle ou comando, etc. (PINTO, 1995).

- **Riscos Empresariais**

São aqueles que envolvem a perda ou ganho financeiro, tais como mudanças em planos econômicos, aplicações financeiras, etc. (DEPARTMENT D'INTERIOR, 2000).

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 a 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 se definido como (VASCONSELOS, 1984):

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

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.

2.1.4 – 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 consequência 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 (DEPARTMENT D'INTERIOR, 2000):

- **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 como externamente à instalação.

Alguns acidentes na indústria química ou nuclear podem ter conseqüências 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 (DEPARTMENT D'INTERIOR, 2000):

- **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 (NATIONAL FIRE ACADEMY, 1983). Os materiais que apresentam risco de incêndio são sólidos finamente divididos, líquidos com baixo ponto de fulgor e gases inflamáveis. 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 (LEES, 1996). O efeito principal da explosão é a onda de choque que pode até destruir estruturas, equipamentos e componentes próximos, além do risco à morte de 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. As explosões podem ser de dois tipos:

- deflagração: os gases liberados expandem-se com velocidades menores ou iguais à do som, podendo resultar numa reação de combustão, pois nem todo o oxigênio é removido do local.

- detonação: os vapores liberados expandem-se com velocidade muito superior à do som.

As explosões podem ser confinadas (acontece numa área limitada) e não confinadas (acontece em área aberta, sem limites ou fronteiras).

- **Liberações tóxicas ou radioativas**

Liberação tóxica ou radioativa é o vazamento acidental, de produtos tóxicos ou radioativos originalmente contidos em sistemas de contenção ou de transporte, que podem ocorrer em locais confinados ou para o ambiente. No caso de gases ou 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.

- **Outros**

Refere-se a eventos externos à planta que podem ser originados por tornados, tremores de terra, queda de aviões, etc.

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 (CROWL e LOUVAR, 1990). Por exemplo:

- para acidentes envolvendo fogo têm-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 tóxicas ou radioativas 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.

2.2 – Análise 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 (KLETZ, 1985b).

O procedimento básico para uma avaliação de risco compreende as seguintes etapas (CETESB, 1994a):

- Descrição e estudo do sistema;
- Identificação dos perigos;
- Análise das probabilidades e causas e dos acidentes;
- Análise das conseqüências dos acidentes;
- Caracterização dos riscos: fase em que são efetuados cálculos para se estimar os riscos advindos da operação da planta, comparando-os com valores de referência. Esses resultados permitem distinguir os riscos em aceitáveis ou não aceitáveis. Se determinado risco não for aceitável, devem ser propostas alterações de projeto a fim de reduzi-lo para um valor tolerável. Mesmo que o risco seja aceitável, devem ser propostas medidas para gerenciá-lo.

De uma maneira geral, a análise de riscos tem por objetivo responder a uma ou mais das seguintes perguntas relativas a uma determinada instalação (SOUZA, 1995):

- 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

análise histórica de 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.

2.2.1 – Técnicas Disponíveis de Análise de Riscos

Na determinação do tipo de análise a ser desenvolvida, do qual dependerá a profundidade e extensão do estudo de uma situação específica, devem ser considerados alguns fatores determinantes como:

- qualidade e profundidade da informação desejada;
- disponibilidade de informações;
- custo de análise;
- tempo disponível antes que decisões e ações devam ser tomadas;
- recursos disponíveis para assistir o processo de análise.

Como recursos devem-se entender não apenas os associados ao desenvolvimento do estudo propriamente dito como também a assistência de pessoal tecnicamente

qualificado para receber e avaliar esse estudo e a disponibilidade desse pessoal para executar essa avaliação.

Diversos são os métodos utilizados que de modo geral diferem de alguma maneira em seu formato devido à diferença de enfoque de cada procedimento de avaliação de risco resultando em diferentes níveis de informação (CETESB, 1994b).

2.2.1.1 - Métodos Utilizados na Análise de Riscos

De uma forma geral, pode-se separar esses métodos em dois tipos:

a) Métodos qualitativos

Os métodos qualitativos, em geral, são os utilizados na fase de identificação de perigos tendo como principal objetivo determinar eventos, ou seqüência de eventos, que levem a situações indesejáveis. Muitas vezes são também considerados métodos qualitativos, ou parcialmente qualitativos, aqueles métodos que fornecem valores numéricos que representam índices de perigos, usados para estabelecer um critério de prioridade entre vários eventos ou sistemas estudados.

Os métodos qualitativos, ou parcialmente qualitativos, normalmente utilizados são:

- **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.

- **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.

- **“What-if” (WI)**

What-if é uma técnica de avaliação 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, “O que ocorreria se a válvula de alívio não abrisse na pressão especificada?” na tentativa de identificar os perigos 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 perigos, 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.

- **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 como uma lista de itens preestabelecidos, criada com base em processos similares, na tentativa de descobrir e documentar as possíveis deficiências dos sistema. Normalmente, o *Checklist* é utilizado para embasar ou fortalecer os resultados obtidos por outras técnicas de análise de riscos. São comuns *Checklist* de partes de equipamentos ou processos operacionais de unidades industriais e de procedimentos de segurança padronizados.

- **“What-if/Checklist”(WIC)**

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.

- **Análise dos Modos de Falhas e Efeitos (AMFEC) – “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 conseqüências 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 desprezados e, portanto, não devem ser analisados apenas pela AMFE.

- **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.

- **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 subseqüentes de falhas possíveis. Desta 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.

- **Estudo de Operabilidade e Perigos – “Hazard and Operability Studies” (HazOP)**

O Estudo de Operabilidade e Perigos, uma 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.

Outras técnicas de análise menos utilizadas, mas que possuem grande importância em casos de estudos de riscos, são:

- **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 (SOUZA, 1995; PORTO et al., 1998).

- **“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 (SOUZA, 1995).

- **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 (SOUZA, 1995).

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

Esta técnica, desenvolvida em 1974, utiliza a AAF como fundamento. Porém, não atribui um valor probabilístico para o evento, e sim, trabalha com um intervalo de probabilidades no qual a falha possa ocorrer (SOUZA, 1995).

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

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 (SOUZA, 1995).

- **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 (SOUZA, 1995).

b) Métodos quantitativos

Os métodos quantitativos são utilizados nas fases de avaliação das conseqüências e avaliação das probabilidades dos eventos ou seqüências de eventos indesejáveis para que seja possível a estimativa do risco inerente a um determinado sistema. Alguns métodos quantitativos são obtidos a partir da complementação de métodos qualitativos com outros dados disponíveis como ocorre com a Análise de Árvore de Falhas, que é considerado um método quantitativo, desde que sejam aplicados dados probabilísticos disponíveis.

São também considerados quantitativos os métodos relativos ao cálculo de conseqüências, como avaliação da concentração de produtos dispersos de um vazamento, da radiação do incêndio, da sobrepressão da explosão, bem como o estudo da vulnerabilidade.

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 de falhas de sistemas, equipamentos, componentes e de acidentes na indústria.
- Programas computadorizados para simulação e cálculo da magnitude das conseqüências de eventos catastróficos, como incêndios, explosões, dispersão de gases tóxicos.
- Programas computadorizados para avaliação da probabilidade de ocorrência de eventos indesejáveis.
- Programas computadorizados que implementam, automatizam e facilitam a utilização das técnicas descritas.

Apesar de cada técnica 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 (TIXIER et al., 2002). 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 utilização 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 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 tal forma que seja realizado um estudo eficiente, mas que não se trabalhe demasiadamente ou desnecessariamente um problema, desbalanceando a análise.

2.2.2 - Análise Histórica de Acidentes

Desenvolvida para auxiliar a identificação de perigos (CETESB, 1994a), a análise histórica de acidentes constitui-se numa avaliação da casuística de acidentes ocorridos na própria instalação em estudo ou em instalações similares.

A análise se dá através da consulta à literatura especializada e/ou a banco de dados específicos, contemplando a avaliação de acidentes em instalações congêneres.

Assim pode-se obter informações sobre :

- Acidentes envolvendo condições operacionais que levaram a perdas totais ou parciais da instalação;
- Acidentes com conseqüências relevantes, como danos às pessoas dentro ou fora das instalações e/ou danos ao meio ambiente.

Uma análise histórica de acidentes tem por objetivo:

- Identificar os perigos em atividades industriais;
- Identificar as causas básicas dos acidentes;
- Levantar tendências históricas e probabilidades de ocorrência de acidentes;
- Aferir os resultados de simulação de modelos de cálculos;
- Auxiliar no desenvolvimento de árvores de eventos.

Da análise histórica poderão ser extraídas:

- As tipologias dos acidentes;
- As causas do acidente;
- A magnitude das conseqüências.

Neste trabalho no Anexo V são apresentados resumos de alguns acidentes ocorridos em instalações industriais, envolvendo amônia, hexafluoreto de urânio, ácido fluorídrico e de alguns acidentes investigados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (“*Environmental Protection Agency*” – EPA)

2.2.3 - Efeitos da Exposição a Substâncias Tóxicas

Substâncias tóxicas são aquelas que quando em contato com o organismo, podem provocar uma ação negativa originando um desequilíbrio orgânico ou a morte (SOTO, SADD, FANTAZZINI, 1995).

As vias de ingresso de substâncias tóxicas e/ou radioativas no organismo são: inalação, absorção cutânea e ingestão. No caso de substâncias radioativas, deve ser considerada a incidência de radiação direta.

O potencial de perigo à saúde apresentado por uma substância química é o resultado de sua toxicidade e do grau de exposição a que uma pessoa é submetida. O grau de exposição depende do tempo de contato com a substância, da quantidade assimilada pelo indivíduo e de fatores biológicos e ambientais. A toxicidade é a capacidade inerente de uma substância química de produzir um efeito nocivo sobre o organismo.

Os efeitos nocivos à saúde podem ser classificados em agudos e crônicos. Os efeitos agudos correspondem às doenças que se manifestam em curto prazo de tempo após a exposição a uma substância tóxica. Os sintomas podem variar desde irritações leves, náuseas e queimaduras até doenças e lesões permanentes de órgãos ou mesmo morte. As reações agudas ocorrem em minutos, horas, ou dias após a penetração do produto tóxico no organismo, sendo resultantes de exposições únicas e intensas ao agente tóxico.

Os efeitos crônicos são originados após repetidas exposições a pequenas quantidades de substância tóxica durante longo prazo de tempo. As doenças resultantes de exposições crônicas podem levar meses ou anos para se manifestarem. Os efeitos crônicos à saúde são irritações, doenças ou mesmo a morte.

Com relação aos efeitos tóxicos de uma substância no organismo, estas são classificadas como (MEYER, 1977):

- Irritantes: são substâncias solúveis em água e que causam irritação ou inflamação nos tecidos do trato respiratório.
- Asfixiantes simples: normalmente são gases, que quando presentes em altas concentrações reduzem por simples diluição a concentração de oxigênio no ar. Tais substâncias não são absorvidas pelo organismo. Podem causar tontura, pulso acelerado, náusea, vômito, inconsciência e até morte.
- Asfixiantes químicos: substâncias que impedem a movimentação de oxigênio no organismo.
- Anestésicos: substâncias que afetam o sistema nervoso central, causando interferências na transmissão de impulsos nervosos, além de efeitos narcóticos os quais podem causar inconsciência e coma.
- Alergênicos: Substâncias que causam reações alérgicas, sendo que seus efeitos são mais significativos em pessoas com pré-disposição alérgica.
- Mutagênicos: substâncias que induzem alterações genéticas no DNA dos cromossomos.
- Carcinogênicos: substâncias que podem causar câncer.
- Teratogênicos: substâncias que causam alterações físicas durante o desenvolvimento fetal.

2.2.3.1 - Limites de Tolerância

Denomina-se “Limites de Tolerância” àquelas concentrações dos agentes químicos, intensidades dos agentes físicos ou doses de radiação, presentes no ambiente de trabalho ou em uma situação acidental, sob os quais os trabalhadores ou a população podem ficar expostos, sem sofrer efeitos adversos a sua saúde.

Estes limites têm por objetivo garantir a proteção da saúde, mas o seu caráter não é absoluto, refletindo o estado em que se encontra o conhecimento científico em um dado momento, as características do trabalho de cada país, as diferentes maneiras como os limites foram estabelecidos.

Entre os índices conhecidos internacionalmente estão:

- IDLH = “Immediately Dangerous to Life or Health”, adequado para exposições breves de origem acidental;
- TLVs = “Threshold Limit Values”, indicado para exposições prolongadas devido às atividades ocupacionais;
- ERPG = “Emergency Response Planning Guideline”, utilizado para exposições de até 3600 s (1 hora).

IDLH

O IDLH, estabelecido pelo “National Institute for Occupational Safety and Health” (NIOSH, 1985), define a máxima concentração de uma substância no ar, liberada durante um intervalo de 1800 s (30 min), sem que essa liberação cause sintomas que impedem a tomada de decisões de proteção individual ou efeitos irreversíveis à saúde. O IDLH é o valor de referência normalmente utilizado pelas equipes que realizam atendimento de emergência envolvendo substâncias químicas. Os valores propostos pelo (NIOSH, 1985) para IDLH são mais protetores à saúde que os do “Lethal Concentration to 50 Percent of Exposure Subject” (LD₅₀), utilizado para indicar a toxicidade a curto prazo de uma substância.

TLVs

Os TLVs são índices desenvolvidos pela “American Conference of Governmental Industries Hygienists” (ACGIH, 1989) que estabelecem as máximas concentrações de substâncias dispersas no ar em condições sob as quais trabalhadores podem permanecer contínua ou diariamente expostos sem que haja efeitos nocivos à saúde.

Conceitua-se três categorias de TLVs:

- TWA - “Time Weighted Average” (Média ponderada no tempo): concentração média ponderada no tempo de uma substância no ar para uma jornada de trabalho de 8 horas diárias e 40 horas por semana na qual os trabalhadores podem estar expostos continuamente, dias após dias, sem efeitos adversos.

- STEL - “Short-term Exposure Limit” (Limite de exposição de curta duração): concentração média ponderada no tempo de uma substância no ar que limita a exposição a não mais do que 15 minutos (900 s) de cada vez e exige um intervalo de pelo menos 60 minutos (1 hora) entre cada exposição, não podendo ser repetida por mais do que quatro vezes por dia.
- “Ceiling”- C (Limite Teto): concentração de uma substância no ar que não pode ser excedido em nenhuma circunstância durante período de trabalho.

ERPG

Os valores de ERPG foram desenvolvidos pela “American Industrial Hygiene Association” (AIHA, 1989) e podem ser utilizados como limites para exposições tóxicas e para planejamento de ações de emergência.

Há três classes de ERPG:

- ERPG-1: máxima concentração de uma substância no ar em que quase todos os indivíduos podem ser expostos por 1 hora (3600 s) sem que ocorram efeitos adversos à saúde mais sérios do que percepção sensorial ou branda irritação.
- ERPG-2: máxima concentração de uma substância no ar em que quase todos os indivíduos podem ser expostos por 1 hora (3600 s) sem desenvolvimento de efeitos irreversíveis à saúde ou sintomas que impeçam a tomada de decisões de proteção individual.
- ERPG-3: máxima concentração de uma substância no ar em que quase todos os indivíduos podem ser expostos por 1 hora (3600 s) sem que ocorram efeitos de ameaça à vida.

Outros

- “Emergency Exposure Guidance Level” (EEGL): esse limite de tolerância é atualmente estabelecido pela “National Academy of Science” (NAS) mas foi originalmente desenvolvido na área militar. O EEGL fornece uma referência para se estabelecer o

máximo nível de concentração no ar de uma substância para uma única exposição em situação de emergência em dado intervalo de tempo, como 1800 s (30 min) ou 3600 s (60 min). A utilização do EEGL é apenas para exposições em que não haja a expectativa de ocorrerem danos irreversíveis à saúde ou de se afetarem as capacidades mentais do ser humano (capacidade de auto- proteção)

- “Level of Concern” (LOC): corresponde à máxima concentração no ar de uma substância extremamente perigosa acima da qual podem ser verificados efeitos irreversíveis à saúde, ou mesmo morte, como resultado de uma única exposição por um intervalo de tempo relativamente curto. Esse índice é estabelecido pela “Environmental Protection Agency” - EPA.
- “Permissible Exposure Limit” (PEL): limite estabelecido pela “Occupational Safety and Health Administration” (OSHA) e tem por objetivo assegurar a saúde dos trabalhadores expostos a substâncias químicas dispersas no ar. Analogamente aos TLVs, são definidos três categorias: o PEL-TWA (utilizado para exposições por longo período de tempo), PEL-STEL (adequado para exposições contínuas por curto período de tempo, ou seja, 15 min) e o PEL-C (usado para exposições agudas).

2.3 – Avaliação de Conseqüências de Eventos Indesejáveis e Priorização dos Impactos Ambientais

2.3.1 – Avaliação de Conseqüências

É a etapa em que as conseqüências dos eventos são classificadas em categorias, de acordo com seus níveis de gravidade.

Em (HANNAMAN et al., 1995) é proposto um método quantitativo para a caracterização de perigos, em que as categorias que definem o grau de severidade de um evento são: catastrófica, crítica, marginal ou desprezível. O método empregado avalia as

conseqüências dos eventos de acordo com os seguintes critérios: impactos sobre a saúde humana, impactos sobre o meio ambiente e impactos programáticos.

Um resumo dessa sistemática é apresentado a seguir, sendo que, no Capítulo 5, a mesma é aplicada a uma instalação de produção de hexafluoreto de urânio (UF₆).

2.3.1.1 – Impactos Sobre a Saúde Humana

Os impactos dos eventos sobre a saúde humana são analisados através de suas conseqüências radiológicas ou toxicológicas sobre o organismo.

Conseqüências radiológicas

As conseqüências radiológicas dependem dos efeitos fisiológicos da radiação (BRYNDA et al., 1978). Na tabela 2.1 as categorias são determinadas em função das doses observadas no local e fora dos limites de propriedade, considerando-se os seguintes valores de dose:

- 5 Sv: dose que causa fatalidades imediatas em 100% dos indivíduos expostos.
- 1 Sv: dose em que o risco de fatalidades imediatas nos indivíduos expostos é desprezível.
- 0,25 Sv: dose em que não se observam efeitos fisiológicos imediatos, como vômitos, náuseas ou diarreia, nos indivíduos expostos.
- 0,005 Sv: dose equivalente efetiva para indivíduos do público possível de ser excedida, durante a operação normal ou falha de um sistema, para que o mesmo seja considerado classe de segurança.

Conseqüências toxicológicas

As categorias de conseqüências toxicológicas são definidas, na tabela 2.2, através de três grupos (dados por valores de limites de tolerância) como indicado na tabela 2.3. A “*Westinghouse Savannah River Company*” (WSRC, 1994), recomenda a utilização dos valores de ERPG3, ERPG2 e ERPG1, dados pela (AIHA, 1989) como guias primários na

determinação dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente. Se os valores de ERPG para dada substância não estiverem disponíveis, então a “*Westinghouse Savannah River Company*” sugere a adoção de parâmetros alternativos, segundo a descrição da tabela 2.4.

Outro sistema de classificação de conseqüências toxicológicas é o proposto no documento NUREG 1391 (USNRC, 1991). No relatório de segurança da usina Claiborne Enrichment Center (USNRC, 1994), por exemplo, foram definidas duas categorias de eventos (evento anormal ou acidente), derivadas dos resultados expostos em (USNRC, 1991).

2.3.1.2 – Impactos Sobre o Meio Ambiente

Os impactos sobre o meio ambiente são classificados de acordo com o nível de contaminação ambiental e com o custo para a recuperação dos ecossistemas afetados (tabela 2.5). Causas típicas que acarretam contaminação ambiental são: derramamentos de substâncias, liberações acidentais para a atmosfera e rompimentos de tanques.

2.3.1.3 – Impactos Programáticos

Os impactos programáticos são importantes no gerenciamento financeiro de perigos, pois estão relacionados com as conseqüências sobre a instalação em termos de prejuízos monetários ou de interrupções na programação normal da unidade. As conseqüências das perdas financeiras são classificadas, na tabela 2.6, em função das quantias gastas, em dólares, com o reparo ou reposição de componentes ou equipamentos da planta.

As conseqüências sobre a operação normal da planta são classificadas, na tabela 2.7, de acordo com o tempo necessário para a retomada da rotina da instalação.

Tabela 2.1: Impactos sobre a saúde: conseqüências radiológicas

Categoria	Conseqüências radiológicas
Desprezível	1. Dose menor ou igual a 0,005 Sv fora dos limites de propriedade 2. Dose menor ou igual a 0,25 Sv no local
Marginal	1. Dose maior que 0,005 Sv fora dos limites de propriedade 2. Dose maior que 0,25 Sv no local
Crítica	1. Dose maior que 0,25 Sv fora dos limites de propriedade 2. Dose maior que 1 Sv no local
Catastrófica	1. Dose maior que 1 Sv fora dos limites de propriedade 2. Dose maior que 5 Sv no local

Tabela 2.2: Impactos sobre a saúde: conseqüências toxicológicas

Categoria	Conseqüências radiológicas
Desprezível	1. Exposição ao público menor que GRUPO 3 2. Exposição nos limites da propriedade menor que GRUPO 2 3. Exposição no local do evento menor que GRUPO 1
Marginal	1. Exposição ao público maior que GRUPO 3 2. Exposição nos limites da propriedade maior que GRUPO 2 3. Exposição no local do evento maior que GRUPO 1
Crítica	1. Exposição ao público maior que GRUPO 2 3. Exposição nos limites da propriedade maior que GRUPO 1
Catastrófica	1. Exposição ao público maior que GRUPO 1

Tabela 2.3: Valores que definem grupos para o urânio solúvel (U) e para o HF

	U solúvel	HF
GRUPO 3	TLV-STEL: $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$	ERPG1: $4,1 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$
GRUPO 2	TLV-C: $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$	ERPG2: $16,4 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$
GRUPO 1	IDLH: $10 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$ (incorporação)	IDLH: $25 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$

Tabela 2.4: Parâmetros recomendados pela (WSRC, 1994) na determinação dos grupos, em ordem hierárquica

Guia Primário	Grupo	Parâmetros alternativos
ERPG3	1	ERPG3 EEGL (1800 s) IDLH
ERPG2	2	ERPG2 EEGL (3600 s) LOC PEL-C TLV-C
ERPG1	3	ERPG1 PEL-STEL TLV-STEL

Tabela 2.5: Impactos sobre o meio ambiente

Categoria	Conseqüências sobre o meio ambiente
Desprezível	Contaminação interna à planta facilmente eliminada. Prejuízos inferiores a 50.000 dólares.
Marginal	Contaminação interna à planta mais mínima contaminação do solo. Prejuízos entre 50.000 e 1.000.000 de dólares.
Crítica	Contaminação interna à planta e do solo. Prejuízos entre 1.000.000 e 10.000.000 de dólares.
Catastrófica	Liberações de quantidades indesejáveis de contaminantes para o meio ambiente. Prejuízos superiores a 10.000.000 de dólares.

Tabela 2.6: Impactos devidos a prejuízos financeiros

Categoria	Conseqüências financeiras
Desprezível	Danos que requerem apenas a reposição de equipamentos de importâncias secundária. Prejuízos inferiores a 50.000 dólares.
Marginal	Danos que requerem a reposição/reparo de equipamentos de importância fundamental ou pequenos danos estruturais. Prejuízos entre 50.000 e 1.000.000 dólares.
Crítica	Danos que requerem reparos extensivos na instalação. Prejuízos entre 1.000.000 e 10.000.000 de dólares.
Catastrófica	Comprometimento total da instalação. Prejuízos superiores a 10.000.000 dólares.

Tabela 2.7: Impactos sobre a operação da planta

Categoria	Conseqüências sobre a operação da planta
Desprezível	Falhas que não causam desvios no processo desenvolvido. Retomada da rotina da planta em período inferior a 7 dias.
Marginal	Falhas que causam pequenos desvios no processo desenvolvido, acarretando a repetição de alguma fase do mesmo. Retomada da rotina da planta em período entre 7 a 90 dias.
Crítica	Comprometimento extensivo do processo desenvolvido. Retomada da rotina da planta em período entre 3 a 12 meses.
Catastrófica	Comprometimento total do processo desenvolvido. Retomada da rotina da planta em período superior a 12 meses.

2.3.2 – Priorização dos Impactos Ambientais

Após se identificar os perigos existentes em um processo ou em uma instalação em estudo, centenas de impactos terão sido também identificados. Uma dificuldade a ser vencida será identificar entre os impactos, a prioridade ou ordem de execução das avaliações das conseqüências. Uma ferramenta denominada “Matriz de Risco” tem se revelado uma ferramenta interessante para priorizar os impactos ambientais, com base nos riscos que os mesmos apresentam (MOURA, 2002).

Ao se falar sobre riscos existe a necessidade de levar em conta duas variáveis que o compõem, como citado abaixo:

- a gravidade da consequência de um evento ou impacto, ou severidade, que dará uma graduação das consequências, desde a morte de pessoas até consequências desprezíveis para pessoas e o meio ambiente, na ocorrência do evento ou de um determinado impacto ambiental considerado;
- a probabilidade ou frequência de ocorrência de um determinado impacto ambiental. A frequência é avaliada quando se trata de um impacto que ocorra com certa constância (como lançamento de um determinado efluente industrial em um curso d'água) enquanto probabilidade é considerada nos impactos potenciais, que normalmente não ocorrem, mas que existe uma chance de que ocorra um evento (como o rompimento de um tanque contendo amônia, cujo vazamento poderia contaminar o ar e/ou um riacho na proximidades).

A matriz de risco é construída ao se combinar os dados de gravidade das consequências com os de frequência ou probabilidade de ocorrência, como será mostrado na figura 2.1.

A avaliação e priorização dos impactos ambientais (MOURA, 2002) poderá prosseguir criando-se três listas para registro:

- Lista para as condições normais de operação (funcionamento contínuo dos equipamentos);
- Lista para as condições anormais de operação (condições de partida, de parada, variações de regime, pequenas avarias previsíveis, etc.);
- Listas para as condições de riscos ambientais (emergências, incidentes, acidentes, ou seja, condições imaginadas e modeladas, com alguma probabilidade de ocorrência).

As categorias de gravidade (severidade) (MIL-STD-882C), indicada na tabela 2.8, são definidas para indicar uma medida qualitativa do pior evento que esteja ocorrendo ou

com risco de ocorrer, resultante de erros do operador, condições ambientais, projeto inadequado, procedimentos inadequados ou falhas e mau funcionamento de sistemas, subsistemas ou componentes. Assim como em (HANNAMAN et al., 1995) esta metodologia (MOURA, 2002) também divide as categorias em: catastrófica, crítica, marginal e desprezível. Para cada categoria é atribuído uma pontuação, que vai de 1 a 4, de acordo com a gravidade ou severidade.

Tabela 2.8: Categorias de gravidade

Descrição	Categoria	Definição
CATASTRÓFICA	I	Morte, perda do sistema ou danos ambientais severos.
CRÍTICA	II	-Ferimentos graves, doença ocupacional grave, danos grandes no sistema ou no meio ambiente; -Consumo significativo de recursos naturais, geração elevada de poluição.
MARGINAL	III	-Ferimentos leves, doenças do trabalho não importantes, danos pequenos nos sistemas ou ao meio ambiente; -Consumo moderado de recursos naturais; geração moderada de poluição e rejeitos.
DESPREZÍVEL	IV	-Menos do que a categoria de pequenos ferimentos, doenças do trabalho não importantes ou não causa danos em sistemas ou ao meio ambiente; -Consumo desprezível de recursos naturais; não causa poluição significativa.

A frequência de ocorrência de impactos ambientais, caso das 2 primeiras listas para condições normais e anormais de operação, ou probabilidade de ocorrência no caso em que a análise esteja sendo feita para identificar riscos (3ª lista) é determinada por pesquisa, análise e avaliação do desempenho histórico do sistema (ou de sistemas semelhantes), como descrito na seção 2.2.2 e exemplificado no Anexo V. A classificação é feita nas seguintes categorias (tabela 2.9): freqüente, provável, ocasional, remota e improvável. Para cada categoria é designado um nível que corresponderá a um determinado valor de pontuação, variando de 1 a 5.

Tabela 2.9: Níveis de Frequência ou Probabilidade de Ocorrência

Definição	Nível	Descrição
FREQUENTE	A	Ocorre freqüentemente (ou alta probabilidade), ou ocorre permanentemente quando iniciada a atividade.
PROVÁVEL	B	Irá ocorrer várias vezes na vida do sistema ou do item.
OCASIONAL	C	Irá ocorrer algumas vezes ao longo da vida do sistema ou do item.
REMOTA	D	Não se espera que ocorra (embora haja alguma expectativa) ao longo da vida do item ou sistema.
IMPROVÁVEL	E	Pode-se assumir que não irá ocorrer, ao longo da vida do sistema ou do item.

Como mencionado anteriormente, da combinação dos dados de frequência ou probabilidade com os de gravidade dos riscos gera-se a “Matriz de Risco”.

Frequência ou Probabilidade	A	5	5	10	15	20
	B	4	4	8	12	16
	C	3	3	6	9	12
	D	2	2	4	6	8
	E	1	1	2	3	4
	X			1	2	3
			IV	III	II	I
			Gravidade			

Figura 2.1: Matriz de Risco

Sugestão de enquadramento (MOURA,2002):

Efeito é crítico: valor igual ou superior a 9 pontos – prioridade 1 para análise de conseqüências

Efeito é significativo: inferior a 9 pontos e igual ou superior a 6 pontos – prioridade 2 para análise de conseqüências

Efeito é reduzido: inferior a 6 pontos e igual ou superior a 4 pontos – prioridade 3 para análise de conseqüências

Efeito é marginal: inferior a 4 pontos – prioridade 4 para análise de conseqüências

Uma outra possibilidade a ser considerada é definir a extensão dos impactos , com possibilidade de quatro enquadramentos:

- Os impactos restringem-se somente ao local de ocorrência;
- Os impactos restringem-se aos limites físicos da instalação;
- Os impactos atingem a região adjacente à instalação;
- Os impactos atingem amplas áreas externas à instalação.

2.4 – Gerenciamento de Riscos

O gerenciamento dos riscos corresponde a medidas técnicas e administrativas que, em função dos resultados de uma análise de riscos, são tomadas para: evitar a ocorrência de eventos indesejáveis, reduzir a magnitude e/ou freqüência de efeitos adversos à saúde e ao meio ambiente, diminuir a vulnerabilidade da exposição de pessoas e propriedades e minimizar as conseqüências de um acidente (CETESB, 1993).

As medidas técnicas que podem ser implementadas em um programa de gerenciamento de riscos são:

- adoção de sistemas de supervisão, controle e segurança nas operações consideradas críticas;
- adoção de normas e padrões restritivos e montagem de sistemas, equipamento e estruturas;
- adoção de critérios de controle de qualidade de componentes e sistemas;
- previsão de sistemas de contenção, exaustão e confinamento nos casos de vazamentos;

- definição de distâncias seguras em relação a centros urbanos, estradas e ferrovias, para a proteção de indivíduos do público;
- adoção de planejamento de emergência, prevendo-se sinalização, acessos e sistemas de comunicação e outros.

As medidas de caráter administrativo têm um enfoque organizacional, sendo que a equipe responsável deve propor: programas de treinamento de pessoal em casos de emergência, atividades desenvolvidas de forma integrada entre diversas áreas da empresa e sistemas de avaliação do desempenho destes programas, providenciando recursos suficientes para se atingir o resultado desejado.

O gerenciamento de riscos é uma responsabilidade da própria empresa que opera a instalação, cabendo ao poder público licenciar e fiscalizar as atividades desenvolvidas (CETESB, 1994a).

CAPITULO 3

METODOLOGIA

3.1 - Procedimento para Avaliação de Riscos

O método de avaliação de riscos utilizado no presente trabalho é semelhante ao proposto em (WORLD BANK, 1985), específico para instalações de processamento químico e aplicável, com algumas adaptações, em instalações nucleares. O método é desenvolvido em fases descritas a seguir e representadas esquematicamente na figura 3.1.

FASE 1: Divisão da planta em unidades funcionais

Divisão da planta em unidades convenientes em função dos processos desenvolvidos, como áreas de produção, armazenamento de substâncias químicas, bacias de retenção de rejeitos, etc. No caso de plantas complexas, as unidades podem ser divididas em sub-unidades para facilitar a análise.

FASE 2: Identificação dos componentes de cada unidade e modos de falha

Em cada unidade são identificados os sistemas e componentes de interesse tais como válvulas, tubulações, conexões flexíveis, cilindros e outros. Cada componente é analisado a fim de se identificar seus possíveis modos de falha como ruptura de tubulações ou conexões, vazamentos de filtros, vasos ou válvulas, etc.

FASE 3: Caracterização do inventário dos componentes

O inventário de todos os materiais perigosos deverão ser determinados considerando o balanço de massa e o fluxo do processo. A descrição de cada inventário

deve conter propriedades tóxico-químicas e radiológicas, pressão, temperatura, volume ou massa e demais condições operacionais.

FASE 4: Agrupamento dos componentes por inventário

Os componentes que possuem inventário mais significativos de substâncias perigosas são selecionados e agrupados. São analisados quantitativamente somente aqueles que possuem os maiores inventários em função da toxicidade, inflamabilidade e quantidades.

FASE 5: Identificação dos perigos

Os perigos de uma instalação podem estar associados à ocorrência de incêndios, explosões, vazamentos de substâncias tóxicas, radiação nuclear e outros; como explicados na seção 2.1.4 e esquematizado na figura 3.2.

Neste trabalho a identificação de perigos é feita na seção 5.3, e a análise abordará casos de liberação de hexafluoreto de urânio (UF_6) para diferentes cenários, considerando três classes de estabilidade atmosférica.

FASE 6: Classificação dos casos de liberação

Algumas das liberações que envolvem o mesmo material sob condições similares, embora em diferentes locais na instalação, podem ser agrupadas numa única classe. Para reduzir a quantidade de cálculos, apenas o caso mais crítico deve ser analisado quantitativamente.

FASE 7: Cálculo das taxas de liberações

Consiste na aplicação de modelos matemáticos adequados para o cálculo das quantidades liberadas para o interior da planta e para o meio ambiente, escolhido em função do tipo de liberação (instantânea ou contínua) e de acordo com a natureza do material e seu

estado físico. A figura 3.3 é uma árvore de eventos, que auxilia na escolha do modelo a utilizar.

FASE 8: Análise de conseqüências

Quantificação das conseqüências dos eventos sobre o homem, a propriedade e ao meio ambiente.

FASE 9: Ordenação de resultados

Organização dos resultados de forma a permitir uma análise segura dos mesmos. Através dessa ordenação de resultados é possível selecionar os eventos indesejáveis que causam os efeitos mais importantes sobre a operação da planta e sobre o meio ambiente.

FASE 10: Estimativa da freqüência de ocorrência dos eventos.

Esta estimativa deverá ser feita com base na experiência prévia, utilizando-se dados da própria instalação ou recursos de análise de riscos como a árvore de falhas e eventos.

FASE 11: Apresentação dos resultados.

Neste trabalho os resultados serão apresentados através de gráficos ou tabelas. Para cada substância existe determinada concentração ou incorporação na qual a mesma não representa perigo à saúde e ao meio ambiente.

FASE 12: Interpretação dos resultados.

Com os resultados obtidos identificam-se os casos mais críticos e os classifica como evento anormal ou acidente.

FASE 13 : Medidas mitigadoras

Com o auxílio das etapas anteriores examinam-se as necessidades de medidas mitigadoras. Para tanto existem recursos de engenharia que permitem amenizar ou anular todo o risco potencial da instalação. Deve-se verificar a possibilidade de alterações no projeto da planta ou apenas modificações na operação da mesma para que os perigos potenciais sejam reduzidos

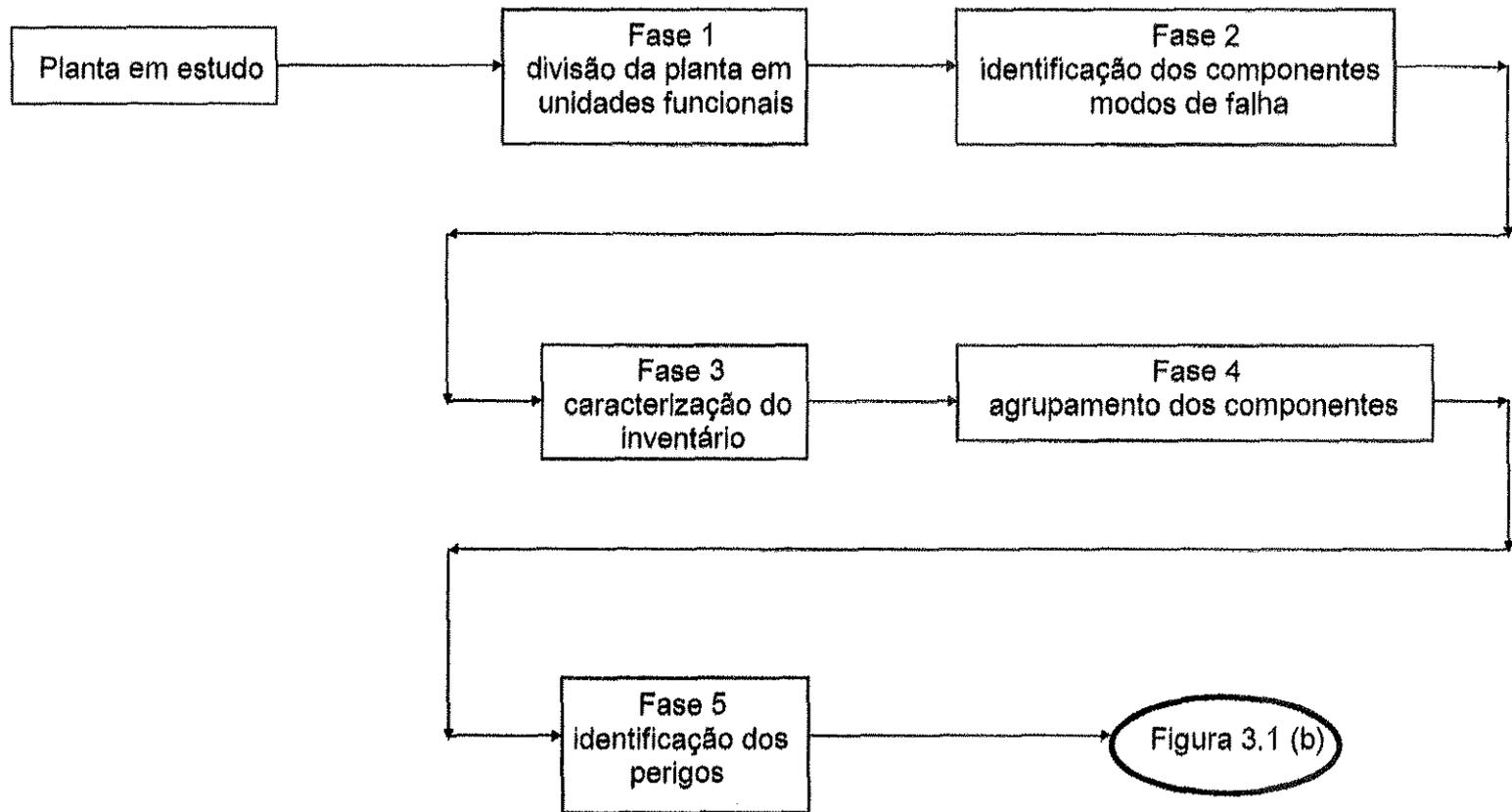


Figura 3.1 (a): Fases para elaboração de um estudo de análise de risco

Figura 3.1(a)

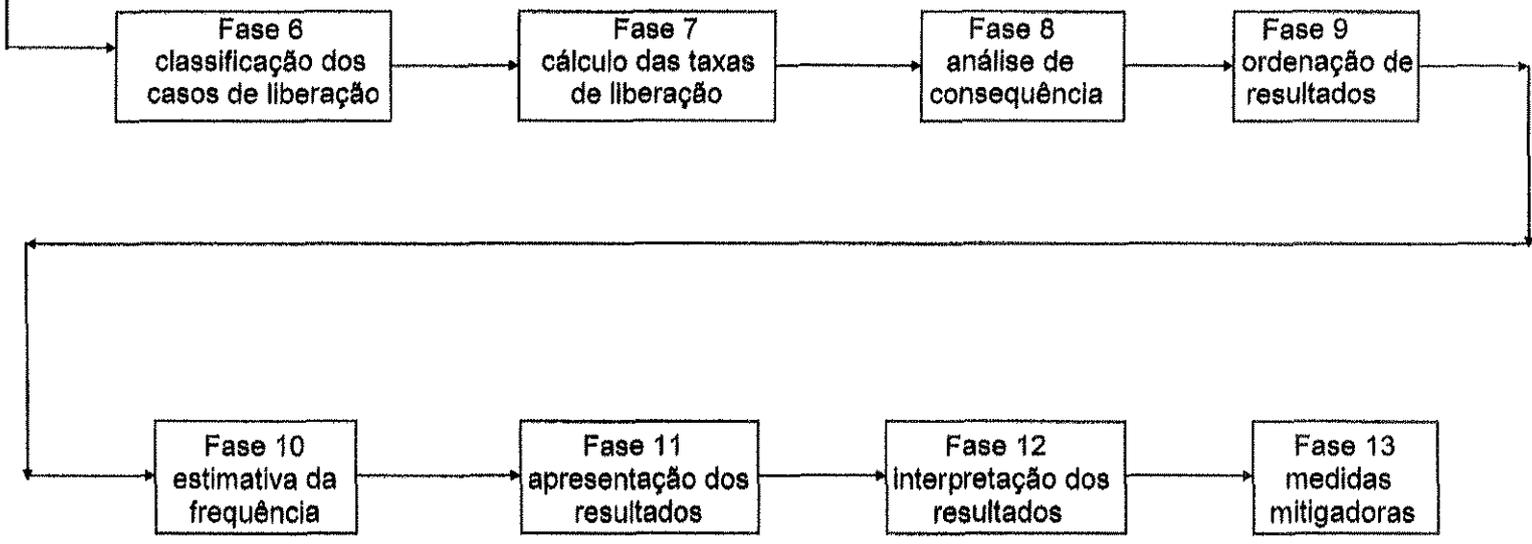


Figura 3.1 (b): Fases para análise de risco no caso de liberação de substância (continuação)

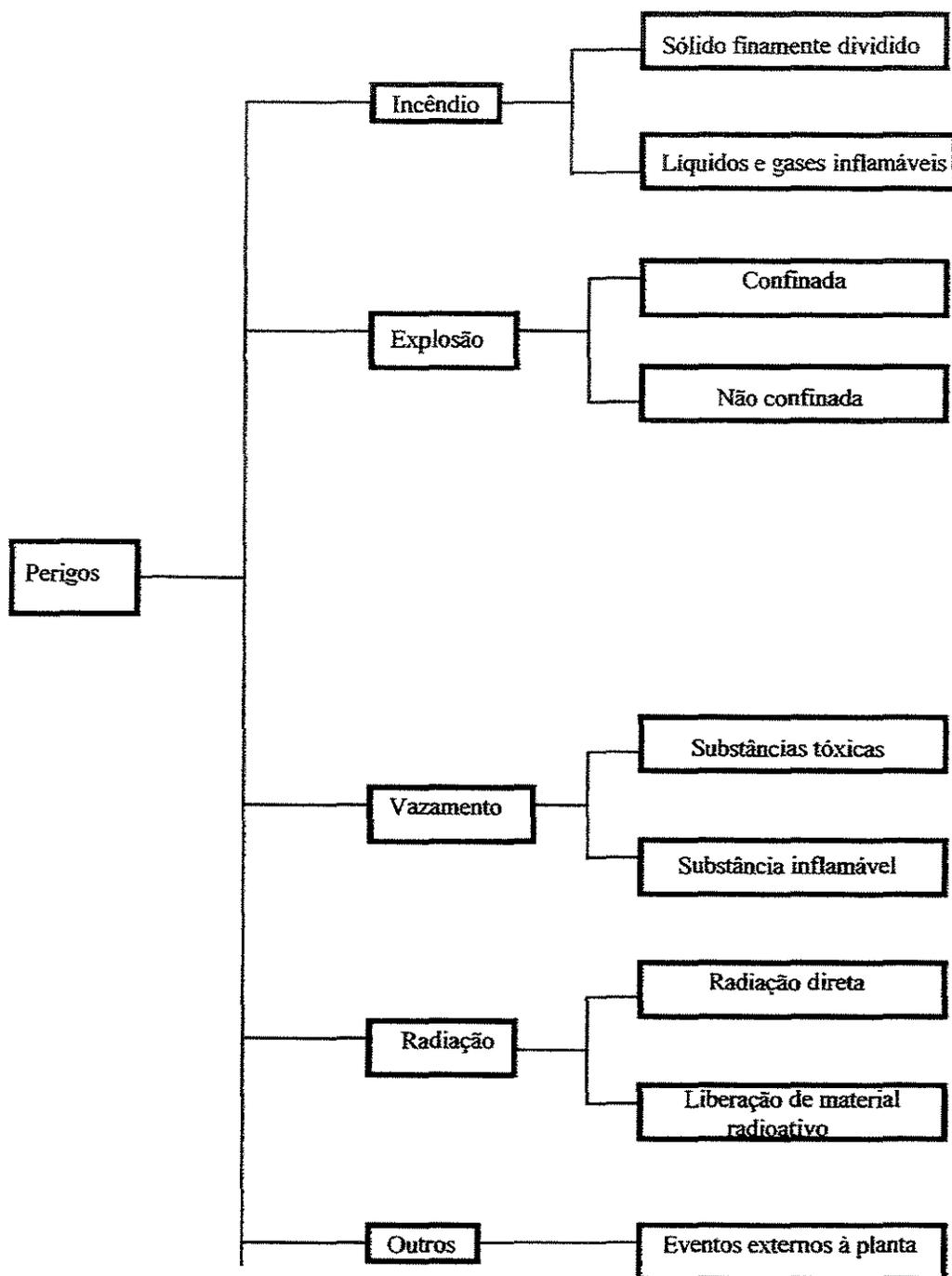


Figura 3.2: Perigos associados a uma instalação

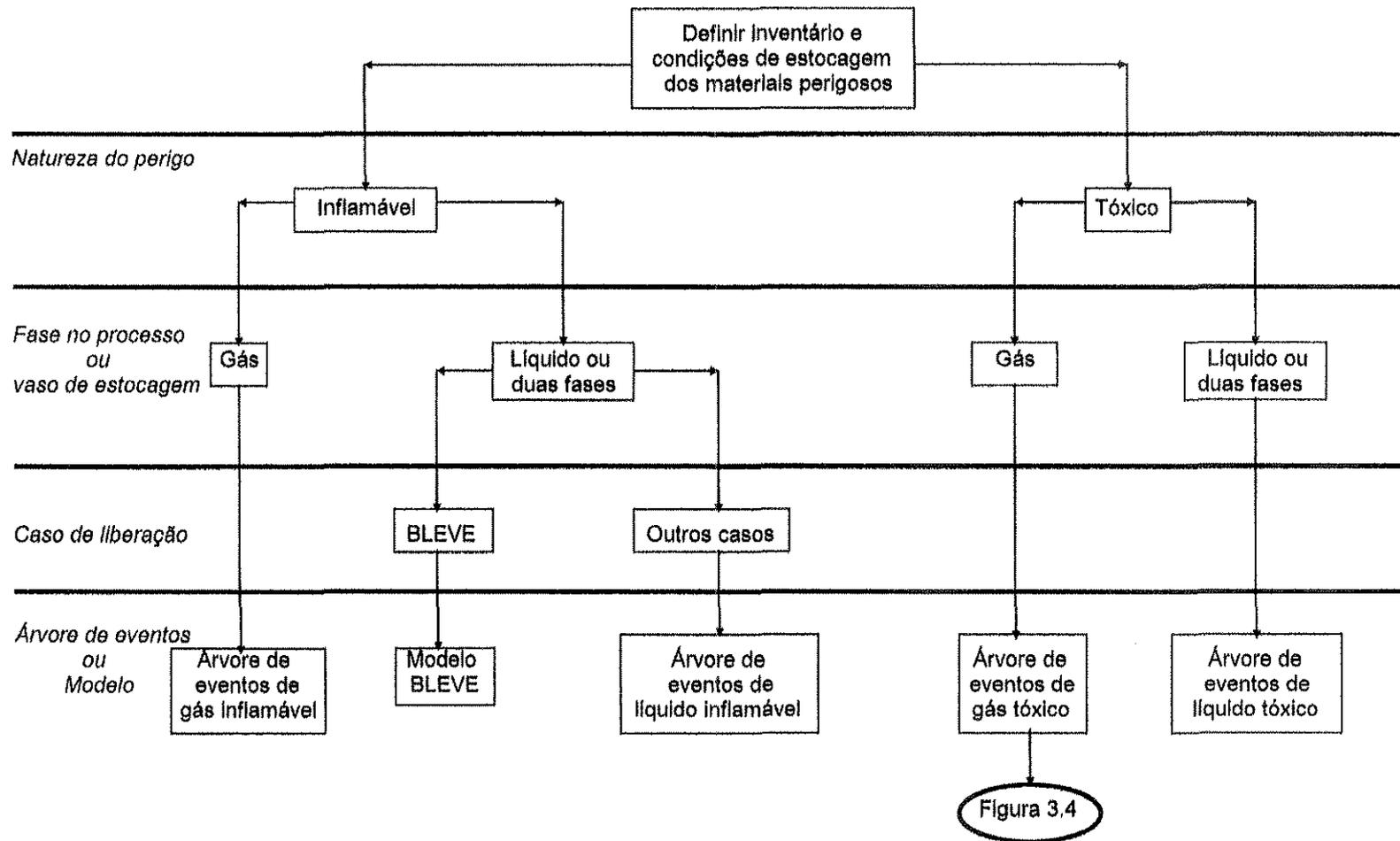


Figura 3.3: Árvore de definição dos casos de falha

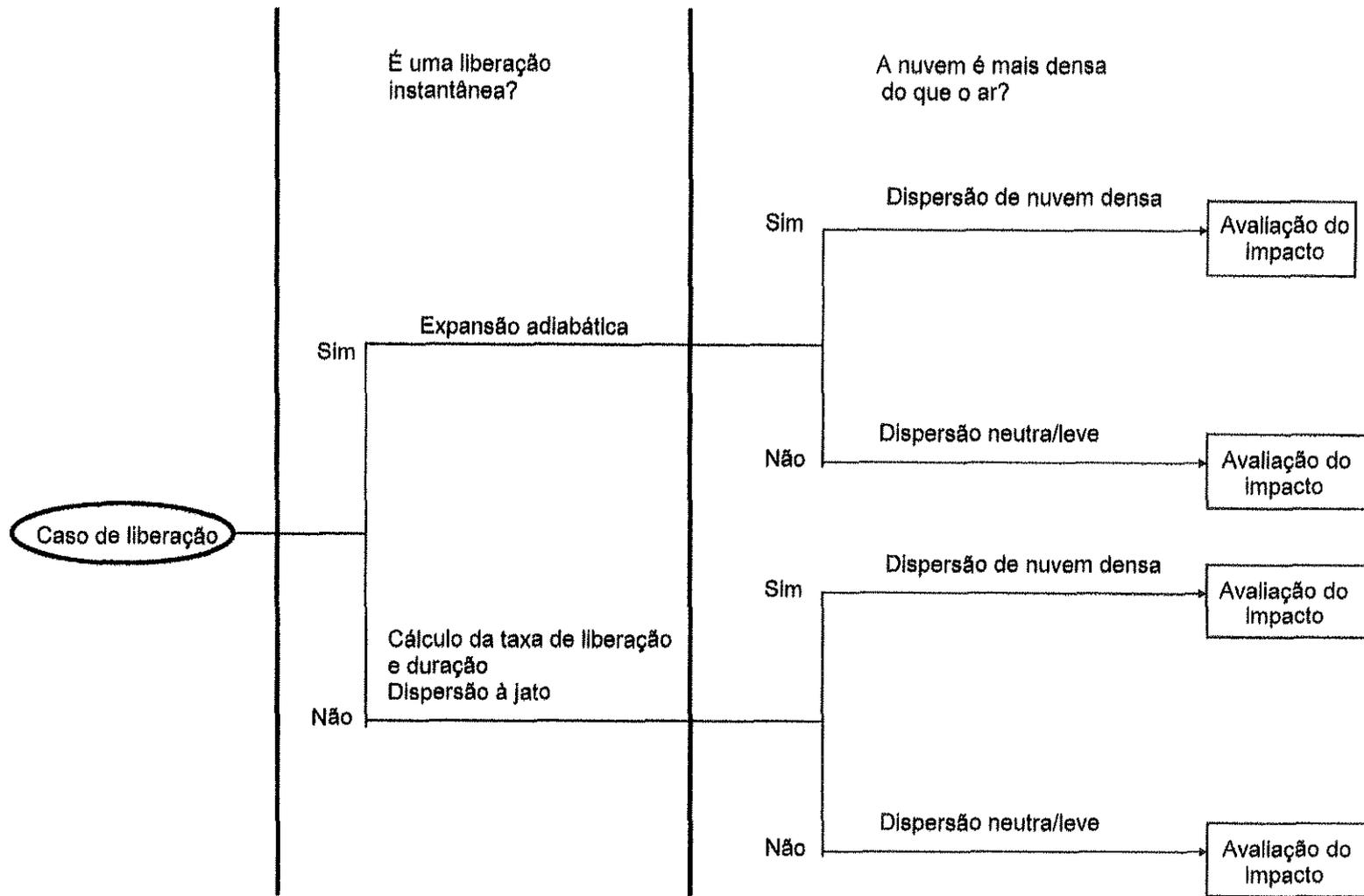


Figura 3.4: Árvore de eventos de liberação de gás tóxico

3.2 – Parâmetros Utilizados no Presente Trabalho

Neste trabalho são utilizados dois critérios distintos para a classificação de vazamentos de UF_6 (e consequentemente de HF e UO_2F_2 para a atmosfera). Esses critérios baseiam-se nas propriedades tóxico-químicas dos produtos de hidrólise do UF_6 .

O primeiro critério, que inclui a análise dos impactos toxicológicos, impactos sobre o meio ambiente e impactos sobre a operação da planta é o proposto nas tabelas 2.2, 2.5 e 2.7 (HANAMANN et al., 1995). Neste critério, as consequências toxicológicas de um evento são classificadas através de três grupos. Neste trabalho, são adotados os valores de ERPG, TLV-STEL, TLV-C e IDLH na definição de cada grupo do urânio (U) solúvel e do ácido fluorídrico (HF), de acordo com a tabela 2.3.

O segundo critério, exclusivamente toxicológico, é o proposto no documento NUREG 1391 (USNRC, 1991), em que o parâmetro IDLH é adotado na classificação de consequências, para indivíduos do público, como evento anormal ou acidente, conforme apresentado na tabela I.5 no Anexo I.

Em relação à classificação e priorização dos impactos ambientais, descrito no Capítulo 2, seção 2.3.2, o registro dos casos propostos tratam de condições de riscos ambientais (3ª lista), sendo construída a “Matriz de Risco” como ferramenta auxiliar na classificação de eventos como a liberação acidental de UF_6 .

CAPITULO 4

ESTUDO DE CASO: PLANTA DE PURIFICAÇÃO E CONVERSÃO DE URÂNIO POR EXTRAÇÃO COM SOLVENTE

4.1 - Introdução

A instalação escolhida para a análise de riscos e impacto ambiental utilizando o método descrito no Capítulo 3, seção 3.1, é a “Kerr Mc Gee Sequoyah Hexafluoride Plant” localizada no município de Sequoyah, Oklahoma, EUA. Esta planta produzia (foi descomissionada) hexafluoreto de urânio (UF_6). O relatório (NRC, 1975), descreve a instalação com detalhes que permite uma análise de riscos da mesma.

4.2 - Descrição da Instalação

4.2.1 - Generalidades

O minério concentrado (“yellowcake”), contendo o urânio é convertido para hexafluoreto de urânio (UF_6) puro por extração por solvente seguido por denitração, redução, hidrofтораção e fluoração em reatores de leito fluidizado. O processo, cujas etapas são descritas em 4.3, consiste das seguintes operações:

- (a) Pré processo: manuseio do concentrado, pesagem, amostragem e armazenamento;
- (b) Digestão em ácido nítrico quente;
- (c) Extração por solvente em contra corrente utilizando fosfato de tributil em hexano;
- (d) Reextração do urânio como solução de nitrato de uranila;
- (e) Calcinação a UO_3 ;
- (f) Redução a UO_2 em leito fluidizado utilizando H_2 e N_2 obtidos com a decomposição da amônia;
- (g) Hidrofтораção a UF_4 em reator contra corrente utilizando HF anidro e;
- (h) Fluoração a UF_6 pela reação com flúor elementar em reatores de chama.

O diagrama de blocos do processo é mostrado na figura 4.1.

A usina operava 24h/d, 365d/ano, processando 33 toneladas de “yellowcake” para produzir 37 toneladas de UF₆ sólido diariamente.

A força de trabalho era composta por 155 operadores, sendo 10% profissionais especializados.

O processamento de urânio natural não requer medidas especiais de proteção contra radiação.

4.2.2 - Layout da Usina

A área total ocupada pela usina era de 4,7 km², sendo que as edificações ocupavam uma área de 300.000 m². Os limites da propriedade eram protegidos por uma cerca externa para impedir a entrada de pessoas estranhas.

A figura 4.2 mostra um layout da usina destacando as principais áreas do processo.

4.2.2.1 - Edificações

Edifício de processo

No edifício do processo encontravam-se os escritórios administrativos, laboratórios de ensaios químicos, área de amostragem, do processo principal e de produção de flúor. A chaminé da instalação de altura de 45,7 m de pé direito encontrava-se também neste edifício.

Edifício da extração por solvente

A etapa de extração por solvente, detalhada em 4.3.3 acontecia em um edifício separado das demais etapas do processo, cuja separação era feita de forma a prevenir maiores conseqüências em caso de incêndio devido à presença do solvente orgânico TPB, substância que apresenta risco de incêndio (vide figura 3.2).

Áreas auxiliares

Fazia parte das áreas auxiliares; tanques de refinado que é o rejeito líquido radioativo, descrito em 4.4.2.1, tanques de rejeitos fluorados (4.4.1.1), área de estocagem de cilindros de UF₆, área de estocagem de substâncias químicas, subestação elétrica, torre de resfriamento, área de estocagem de óleo combustível e área para aterro de rejeitos radioativos sólidos.

A estocagem dos cilindros de UF₆ deve atender os requisitos de segurança descritos no (ORO, 1991). Os rejeitos radioativos sólidos são aterrados de acordo com o código 10 CFR 20.304 (USNRC).

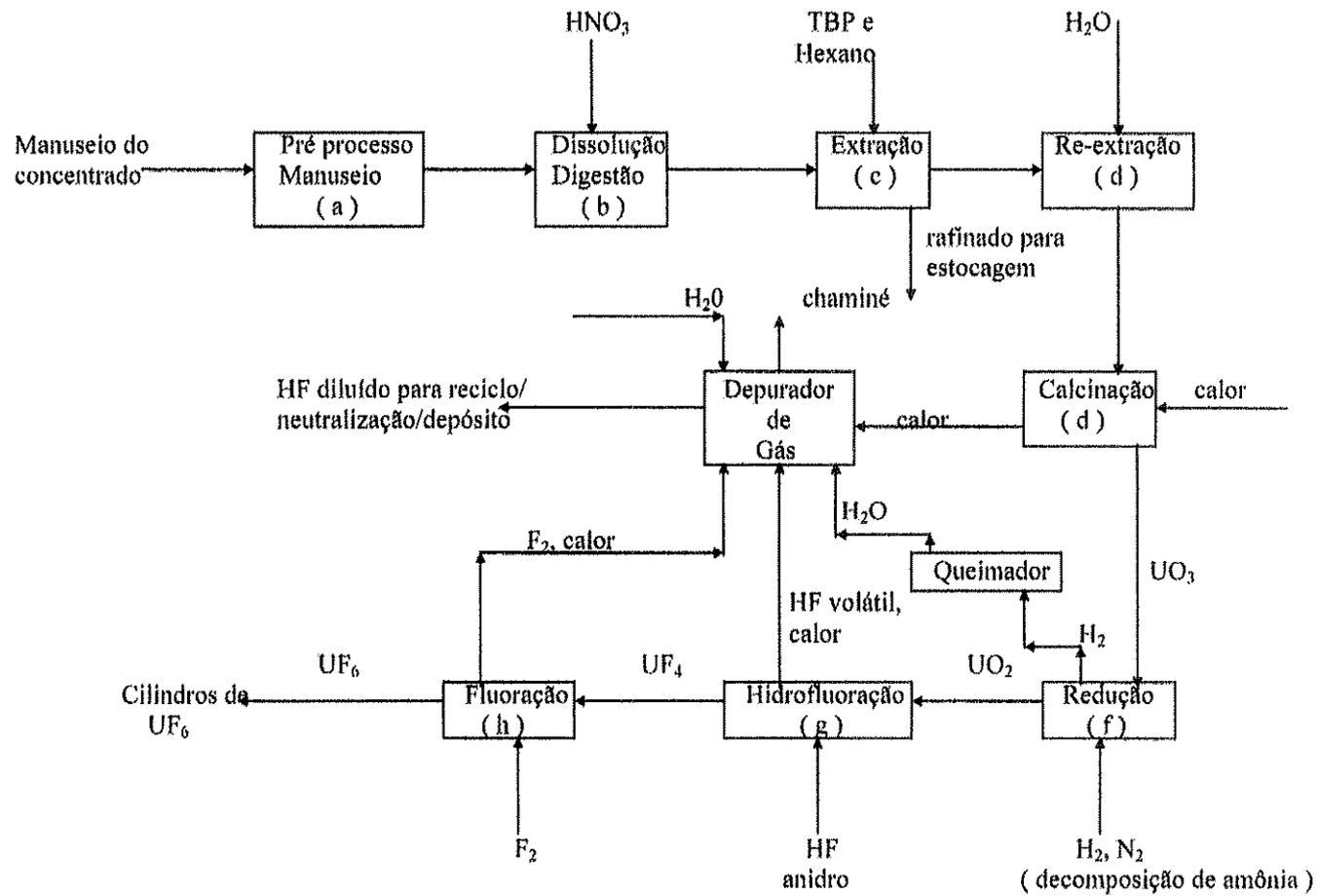


Figura 4.1: Diagrama de blocos - Produção de UF_6

- AP: Área do processo
- BA: Bacia
- CL: Tanques de clarificação
- CF: Células de flúor
- ESC: Estoque de cilindros de UF_6
- ESUO₂: Estoque de UO₂
- L: Laboratório
- LS: Lagoa de esgoto
- SEE: Sub-estação elétrica
- AQ: Área de estocagem de substâncias químicas
- TRA: Bacias de refinado
- XS: Extração por solvente

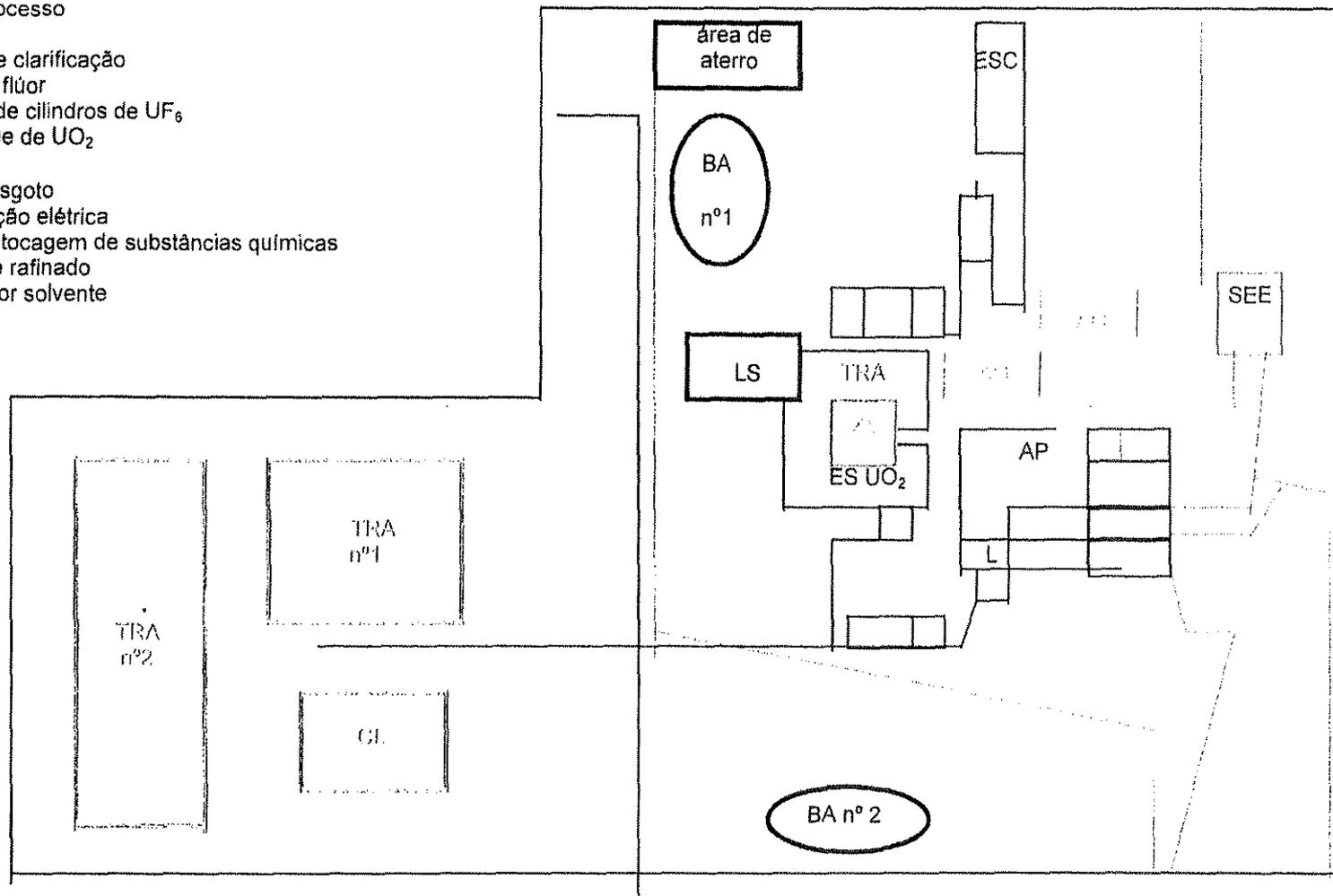


Figura 4.2: Layout da instalação de conversão por solvente

4.3 - Descrição do Processo

4.3.1 - Preparação da Alimentação

Materiais Alimentados

O concentrado de urânio (“yellowcake”), material de alimentação, é constituído principalmente de diuranato de amônio $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$, octóxido de triurânio (U_3O_8) , trióxido de urânio (UO_3) , uranatos de amônio, metais alcalinos ou alcalinos terrosos ou uma mistura de todos.

Geralmente a composição de radionuclídeos no concentrado é:

- Urânio (como U) 60-80%
- Tório (^{230}Th) $3 \times 10^3 - 1 \times 10^4$ pCi/g U
- Rádío (^{226}Ra) 20-400 pCi/g U
- Tório (^{232}Th) 100-200 pCi/g U

Produtos do decaimento radioativo do urânio (^{234}Th , ^{234}Pa) do rádío e do tório podem estar presentes em quantidades de equilíbrio, sendo que para separá-los pode ser necessário mais de um estágio no processo devido ao decaimento do ^{234}Th (meia vida de 24,1 dias).

As impurezas encontradas com maior freqüência no concentrado de urânio, incluem S, SO_4^- , PO_4^{-3} , CO_3^{-2} , F^- , Cl^- , e matéria orgânica, juntamente com impurezas metálicas tais como Al, As, B, Ba, Bi, Ca, Co, Cu, Fe, K, Mn, Mo, Mg, Na, Ni, Nb, Pb, Sb, Si, Ta, Ti, V, W, Zr e terras raras.

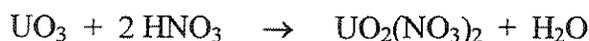
Manuseio, pesagem, amostragem e estocagem

O “yellowcake” é recebido em tambores de 210 L, é pesado, passa pelo processo de amostragem e pode ser estocado por vários meses ou transportado para o processo de dissolução e digestão.

4.3.2 - Dissolução e Digestão

Inicialmente, ácido nítrico é adicionado ao digestor e o “yellowcake” é alimentado a partir de uma tremonha. A reação sob agitação dura em média 8 horas.

Reações químicas:



O produto da reação é uma solução de nitrato de uranila. Os gases gerados nesta etapa do processo são coletados e tratados antes de sua liberação para a atmosfera.

O licor do processo de dissolução pode ser filtrado para remover impurezas silicosas ou, em alguns casos é enviado ao processo de extração por solvente sem filtração.

4.3.3 - Extração com Solvente

O urânio é extraído da solução de nitrato de uranila em um sistema de extração líquido - líquido em contra corrente, usando como solvente orgânico o fosfato de tri-n-butila (TPB) dissolvido em hexano.

É obtido um extrato orgânico carregado com urânio e um refinado aquoso que contém nitrato de amônio, ácido nítrico, impurezas de sal metálico, pequenas quantidades de urânio e produtos radioativos derivados do decaimento normal do urânio.

Estas duas fases, orgânica/aquosa, se separam por diferença de densidade.

Na etapa da extração nem todas as impurezas são eliminadas, é portanto necessário que se proceda a uma lavagem intermediária do extrato orgânico, ou seja, a fase orgânica carregada em urânio.

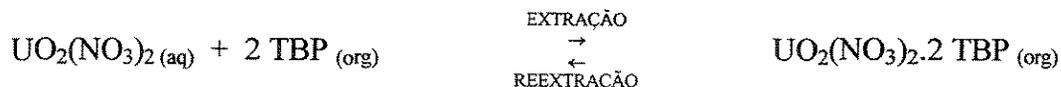
Esta operação, que tem por finalidade reextrair as impurezas coextraídas do urânio, é realizada com uma solução ácida, normalmente uma solução aquosa de HNO₃. A fase aquosa que deixa a etapa de lavagem, contendo urânio ao lado das impurezas reextraídas,

retorna a alimentação da etapa de extração. Este retorno, além de propiciar a recuperação do urânio, concorre para diminuir o teor relativo das impurezas da alimentação.

O extrato orgânico lavado passa para a etapa de reextração, que é efetuada em coluna pulsada. Nesta etapa a solução de nitrato de uranila é separada da solução orgânica com água pura (desmineralizada). O solvente esgotado é regenerado e neutralizado para uso posterior.

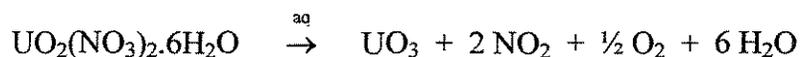
O produto aquoso, contendo urânio reextraído (solução aquosa de nitrato de uranila pura), passa por um processo de evaporação tornando-se altamente concentrado (aproximadamente 1200 gU/l) e parcialmente denitrada, sendo enviado para a etapa seguinte. O esquema do processo é mostrado na figura 4.3.

Reações químicas : Extração por solvente

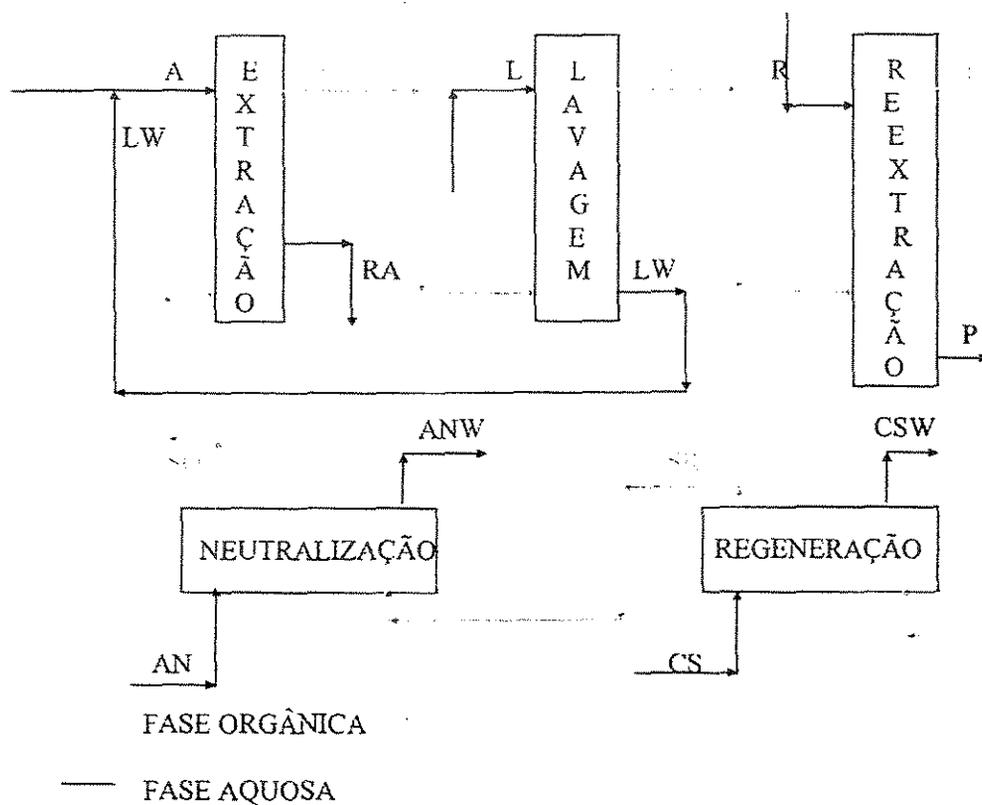


4.3.4 - Denitração - Calcinação

A denitração térmica da solução de nitrato de uranila é efetuada sob agitação constante, a temperatura de cerca de 275°C com insuflação de ar quente. Nestas condições ocorre a formação do UO_3 (trióxido de urânio), de acordo com a reação abaixo:



O denitrador possui ventilação interna que dirige os gases a um lavador que retém os gases nitrosos e as partículas finas de óxidos de urânio arrastados pela corrente gasosa.



A: Alimentação = F + LW

AN: Solução diluída de ácido nítrico para neutralização

ANW: Solução usada da neutralização

CS: Solução de carbonato de sódio para regeneração do solvente

CSW: Solução de carbonato de sódio

EO: Extrato orgânico (carregado com U)

EOL: Extrato orgânico lavado

F: Licor

L: solução de lavagem (L = P)

LW: Lavagem (U + impurezas)

P: Produto (Reextrato aquoso contendo U reextraído)

R: solução reextratante

RA: Refinado aquoso (impurezas)

RO: Refinado Orgânico (sem U)

SO: Solvente orgânico

SR: Solvente orgânico regenerado

Figura 4.3: Extração por solvente

4.3.5 - Redução do Trióxido de Urânio à Dióxido de Urânio

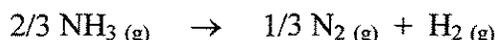
O processo de redução do UO_3 a UO_2 é efetuada em reator de leito fluidizado. O UO_3 em forma de fragmentos escoam em sentido descendente, em contra corrente com um fluxo gasoso de hidrogênio (proveniente do “cracking” da amônia) diluído em nitrogênio.

A redução acontece a uma temperatura média de 540°C , controlada de modo a evitar a sinterização (ceramização) dos sólidos no interior do forno. Essa sinterização tende a tornar a superfície dos fragmentos de UO_3 impermeável à passagem dos gases, impedindo assim que as partes interiores dos fragmentos sejam reduzidas a UO_2 .

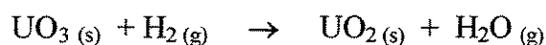
Os gases liberados (produtos da reação e gases que não reagiram no processo) são compostos de H_2O , N_2 , NH_3 e H_2 e pós de UO_3 e UO_2 , passam através de um coletor “hopper” onde as partículas sólidas são separadas e retidas.

Reações químicas:

- Dissociação da amônia:



- Redução do UO_3 a UO_2 :



4.3.6 - Hidrofluoração

A transformação do UO_2 em UF_4 é efetuada em reatores de leito fluidizados por reação com excesso de ácido fluorídrico (HF) anidro e gasoso a temperatura de aproximadamente 345°C .

Reação química:



O dióxido de urânio é alimentado em um dos dois reatores dispostos em série para um primeiro estágio de reação. Como a conversão depende, além da temperatura, do tempo de residência dos reagentes e produtos, a quantidade de UO_2 que não reagiu no primeiro

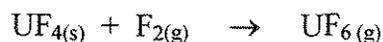
estágio, após filtragem é enviada para um segundo reator onde a transformação é complementada. Os gases de saída são filtrados e liberados para atmosfera, o ácido fluorídrico diluído formado pela presença do HF que não reagiu é estocado para venda ou tratamento.

O produto hidrofluorado é transportado a um coletor, de onde segue para a etapa de fluoração.

4.3.7 - Fluoração e Coleta

O hexafluoreto de urânio (UF_6) é produzido em “reator de chama”, por síntese entre UF_4 e flúor elementar. A reação fortemente exotérmica, exige controle de temperatura.

Reação química:



O diagrama de blocos do processo é mostrado na figura 4.4.

O flúor é posto em contato com UF_4 em pó no reator de chama. A reação tem ocorre com excesso de flúor em relação a quantidade estequiométrica e os gases de UF_6 produzidos são condensados em armadilhas frias (dessublimadores). O UF_4 que não reagiu e algumas impurezas são coletadas em um receptor de cinzas sob o reator de chama que tem por finalidade recuperar o urânio sob a forma de UF_4 .

O flúor em excesso é consumido, em sua maior parte, em um reator secundário, onde o UF_4 residual do reator de chama é misturado com UF_4 novo, em pó, e subsequente colocado para reagir com o excesso de flúor.

O UF_6 obtido no forno secundário é condensado sucessivamente em dois dessublimadores em série. Os dessublimadores primários são resfriados a aproximadamente $2^\circ C$ pela circulação de um líquido refrigerante (água - glicol). O dessublimador secundário é resfriado a aproximadamente $-19^\circ C$ por freon. Periodicamente os dessublimadores são aquecidos acima do ponto de fusão do UF_6 e o produto liqüefeito é transferido para os

cilindros, sendo então estocados por um período e depois enviados para as usinas de enriquecimento.

A transferência do UF₆ dos dessublimadores para os cilindros de estocagem é conduzida por gravidade.

4.3.8 - Produção de Flúor

Uma característica comum às usinas comerciais de produção de UF₆ é o consumo de flúor elementar, produzido na própria instalação. O flúor é obtido por eletrólise do bifluoreto de potássio (KHF₂ ou KF.HF) fundido, contendo várias concentrações de HF livre. O íon fluoreto é oxidado no ânodo liberando gás flúor, e o íon hidrogênio é reduzido no cátodo liberando hidrogênio.

Reações químicas

dissociação do KF . 2 HF



O eletrólito é geralmente preparado pela adição do ácido fluorídrico gasoso no sal bifluoreto de potássio em um vaso sob agitação. O flúor e o hidrogênio produzidos nas células são liberados por sistemas distintos, os quais devem ser mantidos sob pressão similar para evitar o risco de uma reação violenta, devido a mistura dos gases sob a “barreira” que os separa.

Os gases, ao saírem da célula, estão saturados com HF. No caso do hidrogênio, o HF pode ser considerado como uma perda, mas no caso do flúor o HF deve ser separado. Um método de separação consiste na refrigeração do gás a -85°C.

A figura 4.5 mostra o fluxograma do processo de produção de flúor.

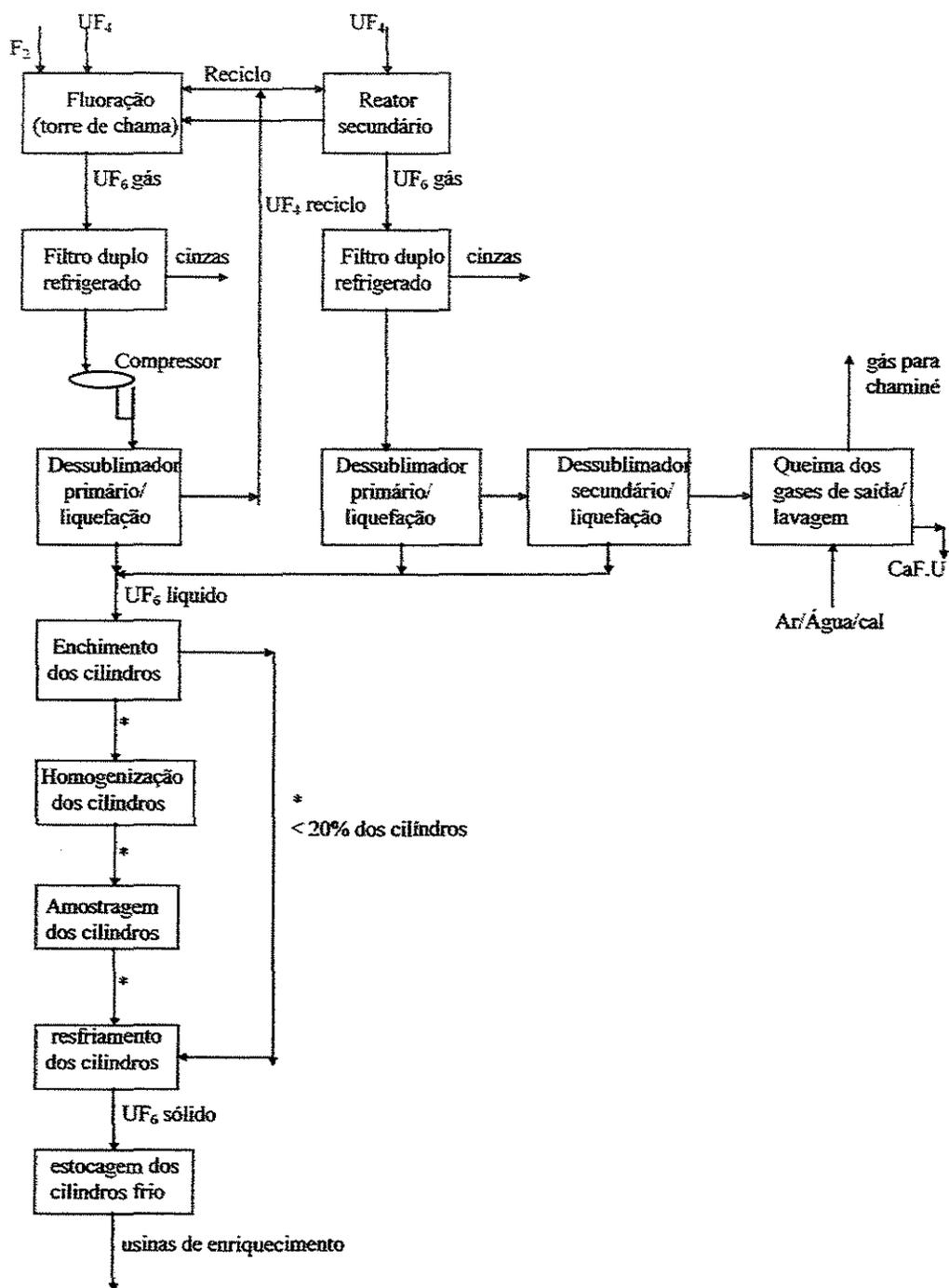


Figura 4.4: Produção de UF_6 - Fluorinação

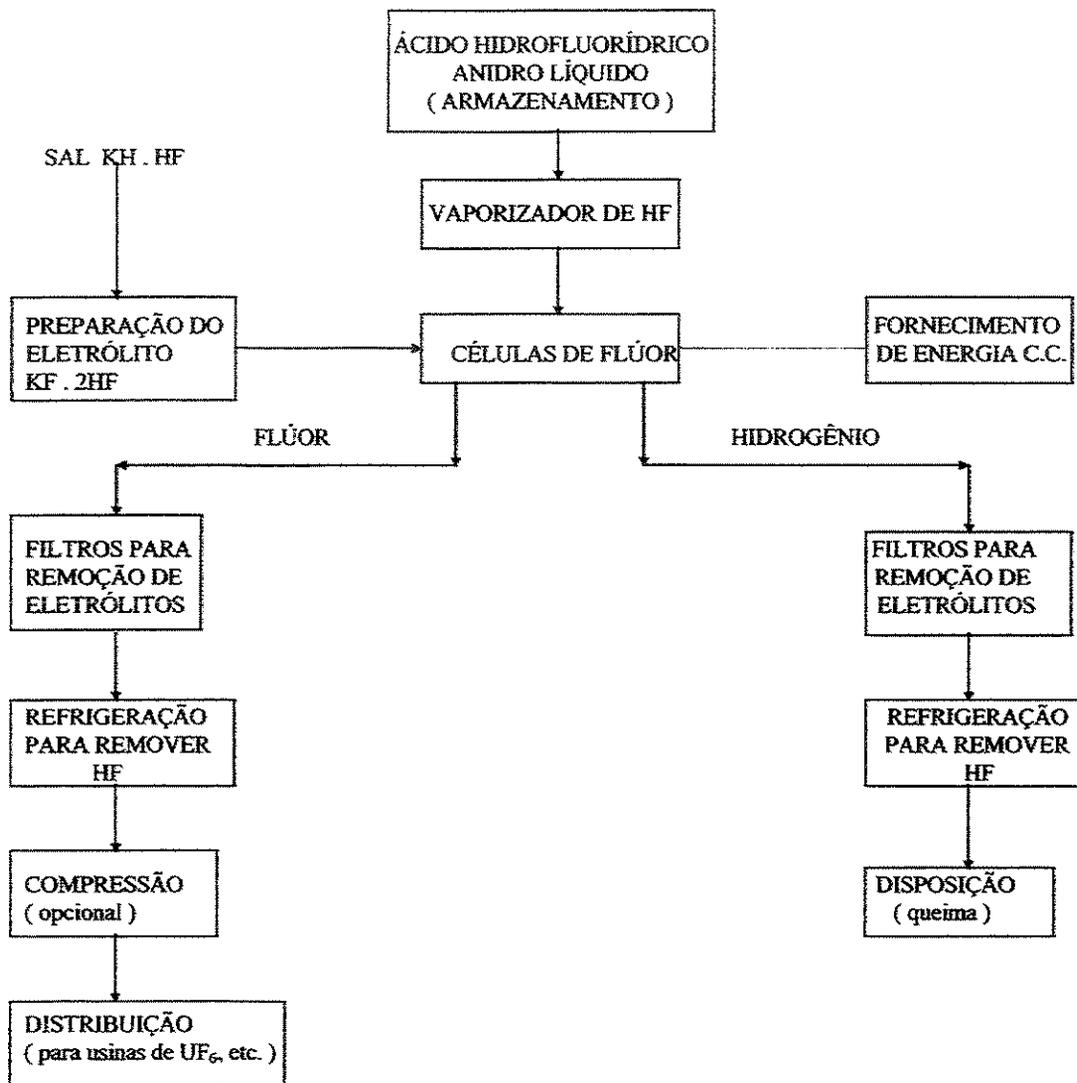


Figura 4.5: Produção de Flúor

4.4 - Processamento de Efluentes e Sistema de Gerenciamento de Rejeitos.

4.4.1 - Processamento de Efluentes

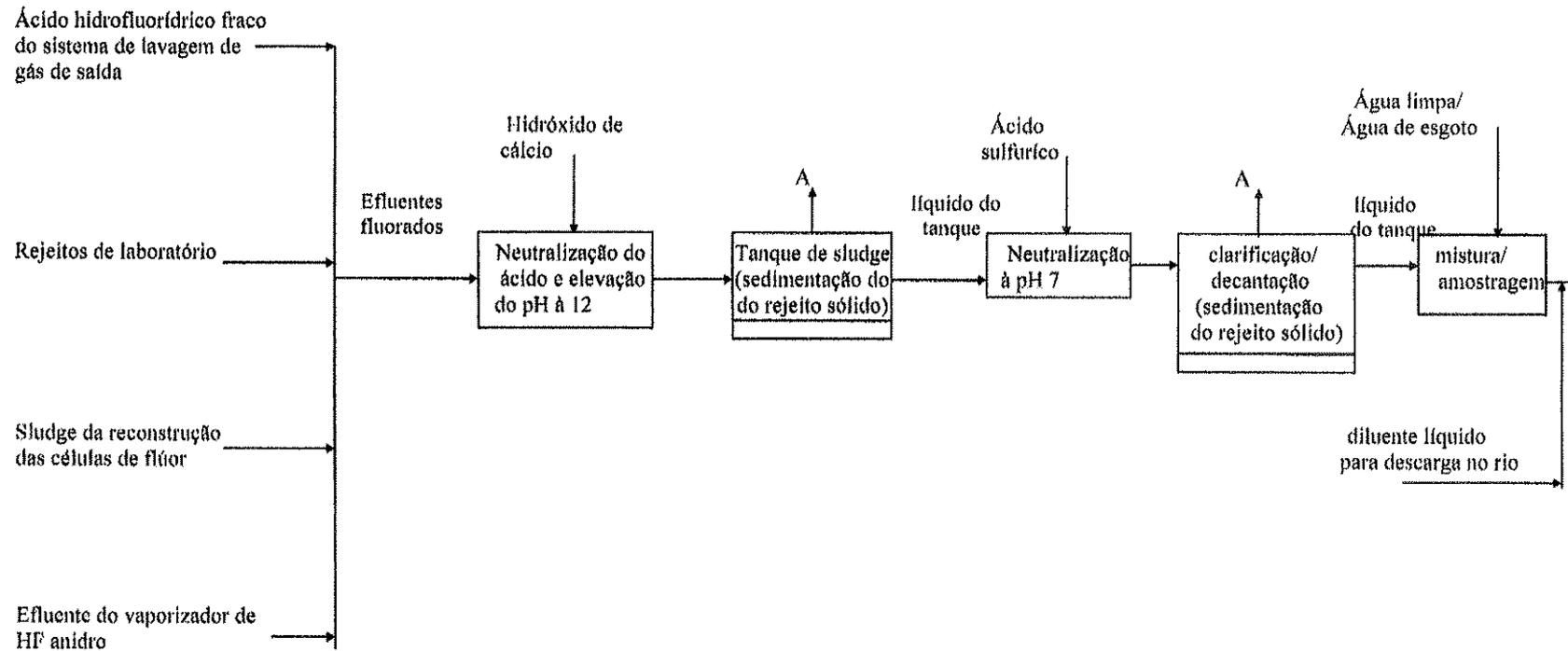
4.4.1.1 - Efluentes líquidos

A figura 4.6 ilustra o sistema de tratamento de efluentes líquidos.

O meio líquido contendo fluoretos consiste de várias correntes:

- Ácido hidrofúorídrico fraco proveniente do sistema de lavagem de saída dos gases dos processos de hidrofúoração, fúoração e do sistema de liberação de emergência de gases dos vasos do processo e tanques de estocagem;
- Rejeitos de laboratório;
- Soluções de carbonato de sódio (sludges) da reconstrução das células de flúor;
- Líquidos do vaporizador de ácido fluorídrico anidro.

Ao meio fluorado resultante da mistura das correntes, é adicionado cal hidratada (hidróxido de cálcio) para neutralizar o ácido e elevar o pH a 12. A mistura resultante de fluoreto de cálcio e lama (“slurry”) segue para um tanque de sludge (lama) de flúor onde o excesso de cal e o fluoreto de cálcio precipitam. O líquido sobrenadante que deixa o tanque de sludge é neutralizado a um pH de aproximadamente 7 pela adição de ácido sulfúrico. A solução resultante é enviada a um tanque de clarificação onde a maior parte do fluoreto de cálcio e sulfato de cálcio suspensos precipitam. Ao líquido proveniente do tanque de clarificação é adicionado água limpa e água da lagoa de esgoto, sendo então misturados, amostrados e descarregados para um rio.



Observação: A = Efluentes gasosos

Figura 4.6: Diagrama de fluxo do sistema de tratamento de efluentes líquidos

4.4.1.2 - Efluentes Gasosos

O tratamento de efluentes gasosos é mostrado esquematicamente na figura 4.7, e consiste principalmente em filtração e lavagem.

O gás liberado do digestor misto é lavado com hidróxido de sódio e a solução resultante é conduzida para o sistema de tratamento de rejeito líquido. Ao gás residual desse processo é adicionado o gás liberado do digestor primário, que seguem para uma coluna de absorção de ácido nítrico.

Os gases do evaporador de simples efeito passam por um condensador, juntam-se aos gases dos tanques do segundo estágio de concentração e dos denitradores. Antes do resfriamento são lavados com uma solução de ácido nítrico a 40% em massa e então passam pela coluna de absorção de ácido nítrico. Após a coluna de absorção, os gases são filtrados e liberados para a atmosfera via chaminé.

O gás liberado do reator de redução passa por filtros de metal sinterizado e filtros manga anterior a queima. Os gases provenientes do queimador são liberados para a atmosfera pela chaminé da instalação.

O gás proveniente do reator de hidrofluoração é filtrado, condensado e lavado.

O gás liberado dos vasos de processo e tanques de estocagem são direcionados à um lavador e liberado.

O gás proveniente do reator de fluoração é filtrado, resfriado em dessublimador e enviado a um queimador de rejeito gasoso junto com o hidrogênio resultante da produção de flúor, que previamente foi filtrado e condensado. Esta queima é efetuada com adição de ar. O gás resultante é lavado e descarregado para o ambiente via chaminé.

O gás da combustão proveniente da caldeira de vapor e da incineração confinada são liberados diretamente para a atmosfera. Já os provenientes do controle de poeira e do sistema de transporte pneumático passam antes por separadores ciclone e filtros manga.

O vapor de hexano resultante da purificação por solvente e o flúor da área de reconstrução das células eletrolíticas e da liberação de emergência são liberados diretamente para a atmosfera.

A água evaporada da torre de resfriamento também é um efluente gasoso.

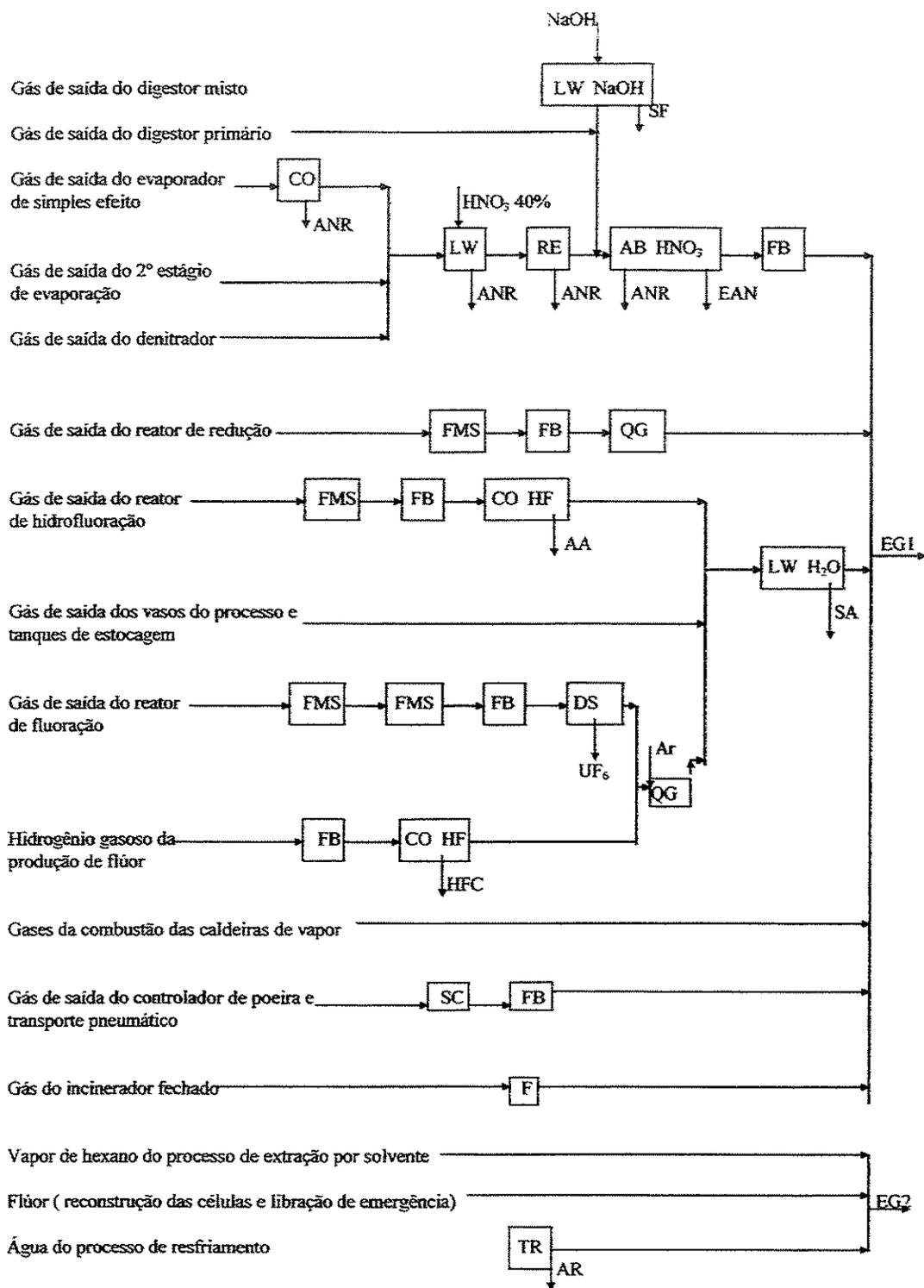


Figura 4.7: Diagrama de fluxo - Sistema de tratamento de efluentes gasosos

Legenda da figura 4.7

AA: Ácido aquoso fornecedor de HF anidro

AB: Absorção

ANR: HNO₃ reciclado para digestor

CO: Condensador

COHF: Condensador de ácido hidrófluorídrico

DS: Dessublimador

EAN: Excesso de HNO₃ para tratamento de rejeito líquido

EG 1: Efluente gasoso para chaminé e atmosfera

EG 2: Efluente gasoso para atmosfera

F: Filtração

FB: Filtro de mangas

FMS: Filtro de material sinterizado

HFC: Ácido fluorídrico para células de flúor

LW: Lavagem

QG: Queimador de rejeito gasoso

RE: Resfriamento

SA: Solução aquosa para tratamento de efluente líquido

SC: Separador ciclone

SF: Solução de fluoreto para tratamento de rejeito líquido

TR: Torre de resfriamento

4.4.2 - Gerenciamento de Rejeitos

4.4.2.1 - Rejeitos Radioativos Líquidos

O rejeito líquido radioativo resultante do sistema de extração por solvente, conhecido como refinado, é composto principalmente por nitrato de amônio, ácido nítrico, impurezas de sais metálicos, pequenas quantidades de urânio e produtos radioativos derivados do decaimento normal do urânio. Este meio é neutralizado com amônia, enviado a um tanque de decantação, onde precipitam a maior parte dos elementos radioativos e impurezas de metal pesado. A lama resultante é confinada em tanques com fundo selado para estocagem. O líquido que evapora é um efluente gasoso.

Outra corrente líquida produzida na usina, como a que contém fluoretos, é considerada como efluente.

4.4.2.2 - Rejeitos Radioativos Sólidos

Os rejeitos sólidos gerados no tratamento por precipitação dos meios refinados e efluentes líquidos, são confinados em suas respectivas bacias de estocagem. Após um período os rejeitos sólidos das bacias de refinado podem ser processados para recuperar o urânio residual, e os das bacias de depósito de rejeitos fluorados podem ser enterrados de acordo com o código de disposição de rejeitos (10 CFR 20.304) ou possivelmente tratados para outro modo de disposição.

Outros rejeitos, como tambores de transporte, “sludge” e outros sólidos que apresentam baixa contaminação de urânio, são enterrados em local apropriado sem embalagens, de acordo com a norma mencionada acima.

4.4.2.3 - Rejeitos não Radioativos Sólidos

Rejeitos não radioativos sólidos combustíveis, tais como caixas, engradados, papel e outras sobras são queimados em incinerador à céu aberto. Outros rejeitos sólidos combustíveis não convenientes para incineração a céu aberto são incinerados de forma confinada e os gases liberados para a atmosfera via chaminé.

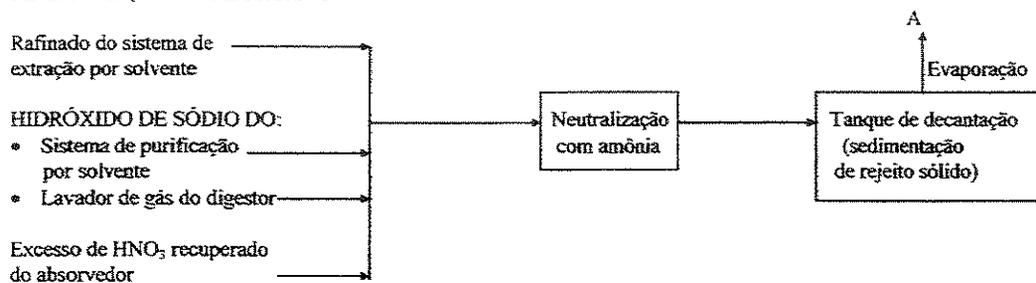
A figura 4.8 mostra os métodos de gerenciamento de rejeitos.

4.5 - Inventário dos Materiais

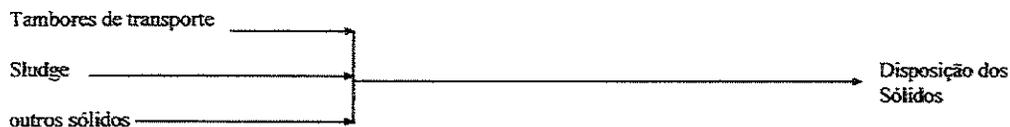
Para estimar o inventário das substâncias utilizadas no processo, assumiu-se um estoque para suprir as necessidades da instalação por 30 dias, tendo como referência o fluxo diário das mesmas, (tabelas 4.1 e 4.2).

Como descrito na seção 4.4, o processo de produção de UF_6 gera efluentes e rejeitos, o fluxo diário produzido destas substâncias é mostrado nas tabelas 4.3 e 4.4.

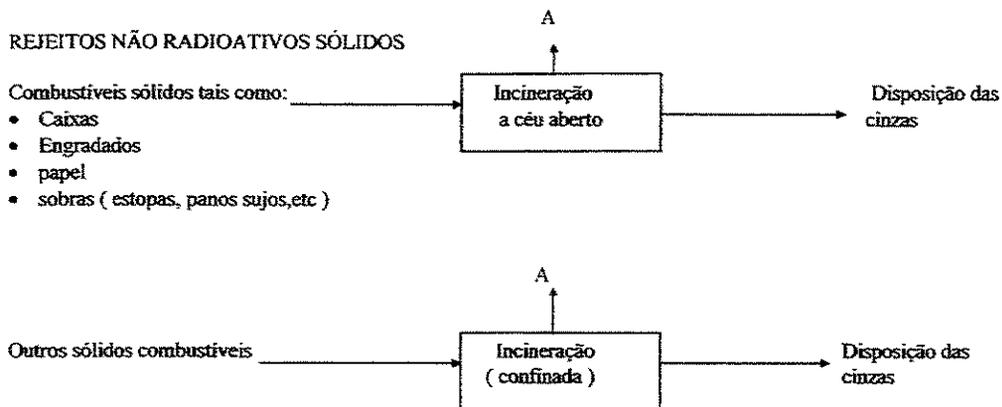
REJEITO LÍQUIDO RADIOATIVO



REJEITOS RADIOATIVOS SÓLIDOS



REJEITOS NÃO RADIOATIVOS SÓLIDOS



Obervação: A = Efluentes gasosos

Figura 4.8: Esquema processo geral de gerenciamento de rejeitos

Tabela 4.1: Fluxo diário de material radioativo

Material	Quantidade (kg/dia)	Urânio (kg/dia)	Forma Química	Fase
Yellowcake	$3,3 \times 10^4$	$2,485 \times 10^4$	$(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$	Sólida
Hexafluoreto de Urânio	$3,7 \times 10^4$	$2,5 \times 10^4$	UF_6	Sólida
Efluentes Gasosos	$1,1 \times 10^6$	$8,7 \times 10^{-2}$	não disponível	Sólida e gasosa
Efluentes Líquidos	$1,4 \times 10^7$	27	não disponível	Sólida e Líquida
Rejeitos Líquidos (refinado)	$8,3 \times 10^4$	3,3	não disponível	Sólida e Líquida
Rejeitos sólidos (tanque de flúor)	$2,0 \times 10^3$	7,6	não disponível	Sólida

Tabela 4.2: Fluxo diário de material não radioativo

Material	Quantidade (kg/dia)	Forma Química	Fase
Ácido nítrico	22.332	HNO_3	Líquida
Amônia anidra	6.096	NH_3	Líquida
Ácido fluorídrico anidro	14.615	HF	Gasosa
Nitrogênio	ND	N_2	Líquido
Hexano	> 460	C_6H_{14}	Líquida
Fosfato de tri-butil	273	$[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{O}]_3\text{PO}$	Líquida
Ácido Sulfúrico	ND	H_2SO_4	Líquida
Soda (pó)	ND	Na_2CO_3	Sólida
Hidróxido de alumínio	ND	$\text{Al}(\text{OH})_3$	Sólida
Hidróxido de sódio	ND	NaOH	Sólida
Bifluoreto de potássio	221	KF.HF	Sólida
Fluoreto de lítio	ND	LiF	Sólida
Sulfato de amônio	1.076	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Sólida
Carbono anódico	ND	C	Sólida
Gás natural	ND	CH_4	Gasosa
Óleo	ND		Líquida
Ácido fosfórico	ND	H_3PO_4	Líquida
Solução ferrosa	ND		Líquida
Cal	12.427	CaO	Sólida

Obs: ND = não disponível

Tabela 4.3: Efluentes não radioativos

Efluentes Gasosos			
Material	Forma Química	Fase	Produção (kg/dia)
Monóxido de carbono	CO	Gasosa	17
Flúor	F ₂	Gasosa	0,36
Hexano	C ₆ H ₁₄	Gasosa	4,6 x 10 ²
Hidrocarbonetos	HxCy	Gasosa	3
Ácido fluorídrico	HF	Gasosa	6,6
Sulfeto de hidrogênio	H ₂ S	Gasosa	ND
Óxido de nitrogênio	NO _x	Gasosa	5,9 x 10 ²
Particulados não radioativos	ND	Sólida	18
Óxidos sulfídricos	SO _x	Gasosa	1,4 x 10 ²
Água	H ₂ O	Gasosa	ND

Efluentes Líquidos			
Material	Forma Química	Fase	Produção (kg/dia)
Cálcio	Ca ⁺	Líquida e Sólida	1,7 x 10 ²
Fluoreto	F ⁻	Líquida e Sólida	10
Nitrato	NO ₃ ⁻	Líquida	18
Sulfato	SO ₄ ⁻²	Líquida e Sólida	2,0 x 10 ²
Cloretos	Cl ⁻	Líquida	6,8 x 10 ²
Alumínio	ND	ND	5,5
Bário	ND	ND	1,7
Cobre	ND	ND	1,2
Ferro	ND	ND	14
Sódio	ND	ND	4,8 x 10 ²
Zinco	ND	ND	0,54

Obs: ND = não disponível

Tabela 4.4: Rejeitos sólidos e líquidos

Contaminados com Urânio					
Material rejeito	Forma	Embalagem	Total (kg/ dia)	Conteúdo de U (kg/dia)	Ci/ano
Rejeito Líquido (refinado)	Ácido nítrico líquido	confinado em tanque	~ 82.800	ND	ND
Rejeito sólido (refinado)	precipitado	confinado em tanques	ND	3,3	~ 0,8
Rejeito sólido com flúor	principalment e CaF ₂	sedimentado	~ 1.900	~ 7,6	~ 1,9
Tambores contaminados	aço	nenhum	ND	ND	ND
Sludge	ND	nenhum	ND	ND	ND

Não contaminados com Urânio			
Material rejeito	Forma	Embalagem	Total
Combustíveis	papel, caixa, etc	incinerador à céu aberto	ND
Combustíveis	ND	incinerador (confinado)	ND
Cinzas do incinerador	ND	nenhum	ND

Obs: ND = não disponível

CAPITULO 5

APLICAÇÃO DO MÉTODO

5.1 - Introdução

Neste capítulo é aplicado o método de análise de risco descrito no Capítulo 3, seção 3.1, cujas fases são indicadas nas figuras 3.1a e 3.1b, tendo a instalação de produção de hexafluoreto de urânio (UF_6) como objeto de estudo.

5.2 - Divisão da Planta em Áreas, Identificação dos Componentes, Modos de Falhas e Inventário de Materiais

A planta foi dividida em quatro unidades funcionais, como segue:

- Área I: Produção de UF_6

O UF_6 é produzido em etapas como descrito em 4.3, para melhor análise, esta unidade foi dividida em três sub-unidades: área da extração por solvente - concentração, fluoração, coleta e retirada do produto.

- Área II: Produção de flúor

O flúor elementar necessário no processo, é produzido por eletrólise do bifluoreto de potássio fundido, como descrito em 4.3.8. A quantidade produzida é proporcional às necessidades diárias, pois estocar flúor é muito complicado devido à sua alta reatividade.

- Área III: Armazenamento de substâncias químicas

Área onde são armazenadas as substâncias de interesse para o processo, destacando-se a amônia anidra (NH_3), o ácido fluorídrico anidro (HF) e a solução de ácido nítrico a 40% em massa (HNO_3) por apresentarem os inventários mais significativos.

- Área IV: Bacias de retenção de rejeitos

Trata-se de tanques com fundo selado para estocar o rejeito líquido radioativo resultante do sistema de extração por solvente, conhecido como refinado, descrição efetuada em 4.4.2.

Para estas áreas, foram identificadas as quantidades e as condições operacionais das substâncias de interesse, os componentes presentes e seus possíveis modos de falha.

I - Área de Produção de UF₆

I.1 - Extração por Solvente - Concentração

1 - Função: separar e purificar o urânio.

2 - Temperatura de operação: menor que 50°C.

3 - Substâncias químicas utilizadas :

- TBP: 273 kg/dia
- Hexano: aproximadamente 460 kg/dia

4 - Propriedades do TBP: Substância tóxica, inflamável com ponto de combustão de 146°C e ponto de ebulição de 289°C.

Propriedades do Hexano: Substância tóxica, inflamável com ponto de fulgor < -20°C, temperatura de ignição de 240°C, ponto de ebulição de 68,7°C.

5 - Produto concentrado obtido: concentração de aproximadamente 1,2 kg U/l

6 - Componentes de interesse:

- Coluna de extração

7 – Possíveis falhas na área:

- falha concomitante no sistema de refrigeração da coluna de extração e no sensor de temperatura
- defeito no controle de temperatura do sistema de refrigeração

8 - Possíveis conseqüências:

- incêndio na área

I.2 - Fluoração e retirada de produto

Esta sub-unidade foi dividida em duas outras:

I.2.1 - Fluoração

1 - Função: converter o tetrafluoreto de urânio (UF_4) em hexafluoreto de urânio (UF_6).

2 - Condição do UF_6 : gás

3 - Fluxo de UF_6 : 0,43 kg/s (SIMAN-TOV et al., 1984)

4 - Temperaturas e pressões de operação:

Reator primário: $T \sim 399 \pm 43,3^\circ C$

$P \sim 101,3 \text{ kPa}$

Compressor: T (não fornecida)

$P \sim 101,3 \text{ kPa}$

Reator de limpeza: $T \sim 454^\circ C$

$P \sim 101,3 \text{ kPa}$

5 - Componentes de interesse:

- Reator primário (fluoração)
- Tubulação de UF_6

6 – Possíveis falhas na área:

- Ruptura na tubulação que transporta UF_6 gasoso para os dessublimadores.
- perda de refrigeração no reator de produção de UF_6 .

7 - Possíveis conseqüências:

- liberação acidental de UF_6

III - Área de Armazenamento de Substâncias Químicas

- 1 - Função: Estocar substâncias utilizadas no processo
- 2 - Componentes de interesse: Tanques de ácido fluorídrico (HF) anidro (2 tanques)
Tanques de amônia (NH₃) anidra (1 tanque)
Tanques de ácido nítrico (HNO₃) (2 tanques)
- 3 - Capacidade nominal dos tanques: de HF: 262,5 t
de NH₃: 235 t
de HNO₃: 412t
- 4 - Capacidade útil dos tanques: de HF; 80% da capacidade nominal:
de NH₃; 85% da capacidade nominal:
de HNO₃; 85% da capacidade nominal
- 5 - Condições de estocagem: Tanques de HF anidro: Pressão: 202,6 kPa
Temperatura: 25°C
Tanques de NH₃ anidra: Pressão: 1722 kPa
Temperatura: 25° C
Tanques de HNO₃: Pressão: 202,6 kPa
Temperatura: 25°C
- 6 - Substância estocada de maior perigo potencial: HF anidro, NH₃ anidra, HNO₃
Outras substâncias estocadas: H₂SO₄, Hexano, Gás Natural
- 7 - Inventário: HF anidro: 420 t
NH₃ anidra: 200 t
HNO₃: 700 t
- 8 – Possíveis falhas na área:
 - Ruptura dos tanques
 - Ruptura nas tubulações de transporte para a área de processo

- furo em tanque ou tubulação

9 - Possíveis conseqüências:

- liberação para a atmosfera de substância tóxica como NH_3 , HF e HNO_3
- explosão tipo BLEVE

IV - Área das Bacias de Retenção de Rejeitos

1 - Função: Reter os rejeitos sólidos e líquidos gerados no processo

2 - Rejeitos contendo urânio :

- Refinado líquido: ~ 82.800 kg/dia
- Refinado sólido: não disponível
- Rejeitos sólidos fluorados: 1.900 kg/dia

3 - Componentes de interesse:

- Tanques de refinado: 3 tanques
- Tanques de rejeitos fluorados: 3 tanques

4 – Possíveis falhas na área:

- ruptura dos tanques
- falha na manta de impermeabilização

5 - Possíveis conseqüências:

- infiltração de rejeito no solo, causando a contaminação dos rios próximos

5.3 - Identificação dos Perigos

Através das informações do relatório (WASH-1284), foram selecionados eventos indesejáveis no processo de fabricação de UF_6 e em outras áreas da planta.

5.3.1 - Principais Eventos Indesejáveis

A identificação preliminar dos eventos indesejáveis resultou nas situações descritas a seguir:

Área I: Produção de UF₆

- Incêndio na área de extração com solvente

O processo de extração, pode ser dividido em duas etapas, sendo a primeira a recuperação do solvente utilizado no processo, a segunda a extração propriamente dita ou seja onde ocorre a purificação de urânio.

Em ambas etapas há a presença de substância orgânica (solvente TPB) que como todo composto carbonáceo apresenta perigo de incêndio. O perigo é minimizado por segregação da área. O processo é realizado em compartimento fechado, separado das demais etapas de produção (como descrito na figura 4.2), de modo que se algo acontece o evento pode ser apenas localizado não tendo dimensões maiores (incêndio confinado).

- Liberação de UF₆ da área de fluoração e coleta

A liberação de UF₆ pode resultar da ruptura na tubulação que transporta o UF₆ gasoso para os dessublimadores ou que transporta o UF₆ líquido para os cilindros, da ruptura ou falha na válvula de um cilindro 48Y (capacidade 14.000 kg). Para a falha na válvula de um cilindro assume-se que a liberação ocorre na área externa diretamente para a atmosfera.

Área II: Produção de flúor

- Explosão nas células de flúor

A reação entre flúor e o hidrogênio é auto inflamável e extremamente energética. Ocorre espontaneamente em temperaturas ambiente como evidenciam as explosões que ocorrem ocasionalmente em células de geração de flúor devido à mistura dos gases H₂ e F₂ (ROYSTON, 1977).

Área III: Armazenamento de substâncias químicas

- Ruptura dos tanques de estocagem de HF, HNO₃, NH₃

A estocagem de grandes quantidades de substâncias químicas em uma indústria traz o perigo de um derrame ou vazamento. Na produção de UF₆ são estocados o ácido nítrico, o ácido fluorídrico e também NH₃. Todas estas substâncias são tóxicas e ou corrosivas (Anexos II, III, IV), podendo causar graves conseqüências ao ambiente e indivíduos se liberadas acidentalmente.

Área IV: Bacias de retenção de rejeitos

- Falha na manta de impermeabilização das bacias de retenção de rejeito

As bacias de retenção de rejeitos é uma característica do processo de extração por solvente - fluoração, etapa na qual geram-se os rejeitos líquidos. Se uma falha acontece em uma bacia de grande volume o conteúdo poderá infiltrar-se no solo e causar contaminação ambiental.

5.4 - Classificação dos Casos de Liberação

Como já mencionado no Capítulo 3, neste trabalho será analisado quantitativamente somente o caso de liberação de hexafluoreto de urânio (UF₆) e conseqüente liberação de ácido fluorídrico (HF_{gasoso}) e fluoreto de uranila (UO₂F₂ sólido), apesar de ter sido identificado vários outros perigos. A escolha de somente analisar quantitativamente as conseqüências de casos de liberação de UF₆ deveu-se a restrições encontradas em relação à disponibilidade de *software* para análise de conseqüências de outros casos de liberação (como NH₃ e HF) e também para análise de outros riscos como explosão e incêndio.

5.4.1 – Classificação dos Casos de Liberação de UF₆

Para efeito de análise, as liberações de UF₆ foram agrupadas em três casos distintos representativos dos eventos de possível ocorrência:

- Caso A: Liberação de UF₆ gasoso do processo de fluoração

- Caso B: Liberação de UF₆ líquido da área de retirada do produto
- Caso C: Liberação de UF₆ líquido devido à ruptura de um cilindro modelo 48Y

5.4.1.1 - Determinação dos Termos Fonte

- Caso A: Falha mecânica nas tubulações de UF₆ gasoso que conecta o reator primário com os dessublimadores. Admitindo-se uma produção nominal de 0,43 kg/s e que permaneça inalterada por 900 s (15 min) após ruptura, serão liberados para a área de processo aproximadamente 387 kg de UF₆ gasoso.
- Caso B: Supõe-se que, durante a operação de transferência, UF₆ no estado líquido, do dessublimador para o cilindro 48Y, ocorra o rompimento de uma tubulação de transporte. Admite-se, conservativamente, que todo o UF₆ líquido presente no dessublimador (9492 kg) seja liberado para o edifício de processo durante 900 segundos (15 minutos). Admite-se o caso mais crítico que é a liberação de UF₆ de um dessublimador primário que tem maior carga.
- Caso C: Liberação para a atmosfera de UF₆ contido num cilindro 48Y. Trata-se do evento ocorrido em Sequoyah no dia 04/01/86, como descrito no Anexo V.

5.4.1.2 - Análise de Conseqüências

A análise de conseqüências de liberações de UF₆ requer o conhecimento das suas propriedades físico-químicas e da sua toxicidade (Anexo I), do estabelecimento de critérios de classificação de eventos e da adoção de um modelo de dispersão atmosférica para cálculo das concentrações em função da distância ao ponto de liberação (Anexo VI).

Na análise de conseqüências, considerou-se que o indivíduo exposto aos efeitos da substância liberada permaneça na linha de centro da pluma durante o período de dispersão.

Incorporação de Urânio

A estimativa da incorporação, por inalação, de substâncias radiotivas liberadas para a atmosfera pode ser feita através da seguinte expressão (NRC, 1986)]:

$$IU = \left(\frac{\chi}{Q}\right) \cdot Mu \cdot BR \cdot fd \quad (4.1)$$

onde:

IU = massa da substância radioativa incorporada por inalação (mg)

$\frac{\chi}{Q}$ = fator de dispersão atmosférica em função da distância (s/m^3), calculado conforme

Anexo VI

BR = taxa de respiração média de um indivíduo, considerada $2,66 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (NRC, 1986)

Mu = massa de urânio liberada (mg)

fd = fator de correção de deposição seca

Considera-se que os particulados resultantes da liberação do UF_6 tem diâmetro de aproximadamente 10^{-6} m , sendo portanto perfeitamente inalados.

Concentração de HF

A concentração de HF (C_{HF}) no ar é dada pela expressão (NRC, 1986):

$$C_{HF} = \left(\frac{MHF}{t}\right) \left(\frac{\chi}{Q}\right) \quad (4.2)$$

onde:

MHF = massa de HF formada na hidrólise do UF_6 liberado

t = tempo de liberação (s)

Dose equivalente efetiva comprometida

A estimativa da dose equivalente efetiva (De), no órgão crítico, devido à inalação do radionuclídeo emissor, em função da distância, pode ser feita através da seguinte expressão (NRC, 1986):

$$De = BR.f_d \times \frac{\lambda}{Q} \times \sum_{i=1}^n A_i \times DCF_{e_i} \quad (4.3)$$

onde:

De = dose equivalente efetiva no órgão, devida à inalação do radionuclídeo (Sv)

A_i = atividade específica do isótopo i liberado (Bq)

DCF_{e_i} = fator de conversão de dose efetiva para o isótopo i (Sv/Bq)

Neste trabalho não será calculado doses de radiação, pois resultados de outros trabalhos (USNRC, 1991) mostram que o perigo de uma liberação acidental de UF_6 , não enriquecido, está relacionado com o potencial de risco tóxico-químico do UF_6 e seus produtos de hidrólise e não às suas propriedades radiológicas.

5.5 – Resultados das Análises de Conseqüências

5.5.1 - Análise Quantitativa da Liberação de UF_6

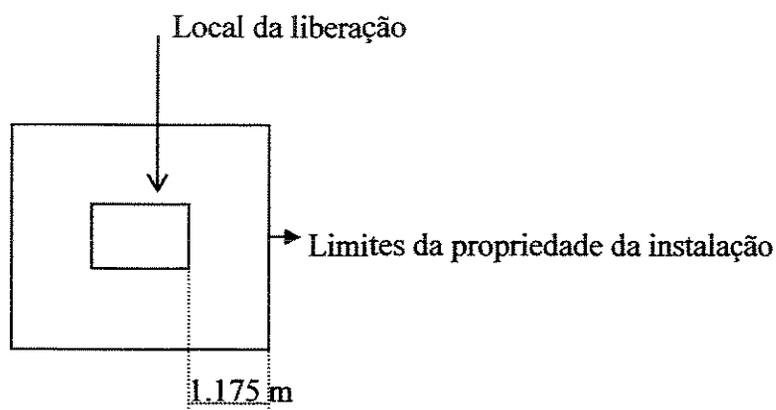
Os cálculos para a avaliação das conseqüências da liberação de UF_6 foram efetuados com o programa (CONV_ACI, 1990), descrito no Anexo VIII. Foram calculados em função da distância ao ponto de liberação a incorporação de urânio (IU), e a concentração de HF (C_{HF}), considerando-se duas classes de estabilidade atmosférica: Pasquill D e Pasquill F (Anexo IX).

Os casos de liberação de UF_6 analisados quantitativamente, foram o caso B e o caso C (definidos em 5.4.1.1), pois representam o maior perigo potencial. Estes casos representam os casos que o UF_6 está no estado líquido e em quantidades apreciáveis.

Na avaliação de conseqüências são definidas as seguintes áreas:

- Área 1: dependências internas ao edifício, onde são analisados os impactos sobre a saúde dos trabalhadores da instalação.
- Área 2: dentro do sítio, ou seja, área limitada pelo edifício e pelos limites de propriedade da instalação, onde são analisados os impactos sobre a saúde dos trabalhadores da instalação.
- Área 3: área externa aos limites da propriedade da instalação, onde são analisados os impactos sobre a saúde dos indivíduos do público.

Considerou-se que os limites da propriedade está situado à 1.175m do ponto de liberação.



As análises são realizadas através da aplicação de dois critérios distintos, como já citado no Capítulo 3, a saber:

- Critério 1: proposto por (HANNAMAN, et al., 1995) na tabela 2.2, onde são avaliadas as consequências toxicológicas sobre a saúde dos trabalhadores (Áreas 1 e 2) e indivíduos do público (Área 3). A tabela 2.5 será utilizada para a classificação dos impactos sobre o meio ambiente. Não foram avaliados os impactos sobre a operação da planta e devidos a prejuízos financeiros, conforme o critério apresentados nas tabelas 2.7 e 2.6 respectivamente.
- Critério 2: proposto pelo documento NUREG 1391 (USNRC, 1991), descrito na tabela I.5, o qual analisa as consequências toxicológicas sobre a saúde dos indivíduos do público (Área 3), classificando-as em evento anormal ou acidente. Este critério auxilia a

verificar se a extensão dos impactos restringem-se somente ao local da ocorrência, restringem-se aos limites físicos da instalação ou os impactos atingem regiões externas à instalação. Este critério também pode ser utilizado como parâmetro para verificar a necessidade da adoção de medidas de emergência externas para a proteção de indivíduos do público, pois fornece referências que indicam quando um impacto os atinge.

5.5.1.1 - Avaliação Quantitativa do Caso B

Caracterizado por um vazamento num dessublimador primário contendo 9492 kg de UF₆ líquido. Como resultado dessa liberação, parte do produto será solidificado e o restante vaporizado. A fração de UF₆ vaporizada é dada pela expressão (SIMAN-TOV et al., 1984):

$$v = \frac{H_l - H_s}{Q_s} \quad (4.12)$$

onde:

v = fração de UF₆ vaporizada

H_l = entalpia do UF₆ líquido na temperatura de operação (kJ/mol)

H_s = entalpia do UF₆ sólido à pressão atmosférica (kJ/mol)

Q_s = calor de sublimação do UF₆ (kJ/mol)

Nas condições operacionais da planta a fração vaporizada é de 49% (SIMAN-TOV et al., 1984).

Três cenários são propostos para este caso:

- B1 - Devido a uma falha no sistema de exaustão, toda a quantidade de UF₆ vaporizado (4651,08 kg, correspondendo a 3138,6 kg de urânio e 1057 kg de HF) é liberado para a atmosfera, ao nível do solo, durante 900 s (15 min).

- B2 - O sistema de exaustão falha, mas da quantidade total de UF₆ que é vaporizado (4651,08 kg), apenas é liberada, ao nível do solo, para a atmosfera uma parte do produto que reage com o ar. Admite-se que é liberado, 80% do HF (845,65 kg) e 50% do urânio (1560,30 kg), o restante fica confinado no interior da instalação (CNEN, 1980).
- B3 - Dá-se crédito ao sistema de exaustão, e supõe-se que 90% do UF₆ vaporizado (4651,08 kg) é retido pelos filtros e lavadores de gases. Portanto é liberado, ao nível do solo, para a atmosfera 313,86 kg de urânio e 105,7 kg de HF.

As figuras de 5.1 a 5.6 apresentam os resultados dos cenários propostos, sendo que para cada um foram consideradas duas classes de estabilidade atmosférica: Pasquill D (estabilidade atmosférica neutra com velocidade de vento (u) igual a 3m/s) e Pasquill F (estabilidade atmosférica moderadamente estável com velocidade de vento (u) igual a 1m/s).

5.5.1.1.1 – Análise do Caso B1

Critério 1: Os resultados apresentados nas figuras 5.1 e 5.2 indicam que as conseqüências toxicológicas referentes à exposição ao HF e a inalação do urânio solúvel são classificadas como:

- Catastrófica, condição de estabilidade atmosférica Pasquill D e F, pois a concentração de HF e a incorporação de urânio para indivíduos do público (Área 3) superam os valores do GRUPO 1 (tabelas 2.2 e 2.3).

Em relação aos impactos sobre o meio ambiente a categoria para este evento poderia ser classificado no mínimo como crítica (tabela 2.5). pois ocorre liberações de quantidades indesejáveis de contaminantes para o meio ambiente, contaminando ar e solo. Para uma análise mais detalhada deste impacto, seria necessário uma equipe multidisciplinar, referências e padrões mais preciso do que os disponíveis em (HANNAMAN et al., 1995).

Critério 2: Observa-se que, para a classe de estabilidade Pasquill D, a concentração de HF é inferior ao IDLH (35.10^{-6} kg/m³) e a incorporação de urânio inferior a 10.10^{-6} kg, níveis de referência estabelecidos em (USNRC, 1991), a partir de 1600 m e 1400 m do ponto de liberação (Área 3), o que classifica o caso como acidente. A condição de estabilidade atmosférica Pasquill F é mais crítica, pois verifica-se que a concentração de HF é superior ao valor de IDLH até a distância de 7600 m, e a incorporação de urânio superior a 10.10^{-6} kg até a 1500 m do ponto de liberação, caracterizando acidente.

5.5.1.1.2 – Análise do Caso B2

Critério 1: De acordo com as figuras 5.3 e 5.4, as conseqüências toxicológicas referentes a exposição ao HF e a incorporação do urânio solúvel são classificadas como:

- Crítica, classe D de estabilidade atmosférica, pois a concentração de HF e a incorporação de urânio para os indivíduos do público (Área 3) superam os valores do GRUPO 2 e no sítio (Área 2) o valores de concentração de HF e urânio superam os valores do GRUPO 1.
- Catastrófica, classe F de estabilidade atmosférica, pois a concentração de HF e a concentração de urânio para os indivíduos do público (Área 3) superam os valores do GRUPO 1.

Em relação aos impactos sobre o meio ambiente a categoria para este evento poderia ser classificado como crítica (tabela 2.5). Porém como no caso anterior uma análise precisa deste impacto em relação ao meio ambiente, seria necessário uma equipe multidisciplinar.

Critério 2: Para a condição de estabilidade atmosférica Pasquill D, nas proximidades dos limites da propriedade, a concentração de HF é inferior ao IDLH e a incorporação de urânio a 10.10^{-6} kg, podendo o mesmo ser classificado como evento anormal. Na condição F, os resultados caracterizam acidente, pois a concentração de HF é inferior ao IDLH a partir de 6700 m e a incorporação de urânio é inferior aos 10.10^{-6} kg a partir de 1300 m do ponto de liberação.

5.5.1.1.3 – Análise do Caso B3

Critério 1: Observando-se os resultados apresentados nas figuras 5.5 e 5.6, as consequências toxicológicas referentes a exposição ao HF e a inalação do urânio solúvel são classificadas como:

- Marginal, classe D de estabilidade atmosférica, pois a concentração de HF e a incorporação de urânio no local do vazamento (Área 1) é superior ao valor do GRUPO 1.
- Crítica, classe F de estabilidade atmosférica, pois a concentração de HF e a incorporação de urânio no sítio (Área 2) é superior ao valor do GRUPO 1.

Em relação aos impactos sobre o meio ambiente a categoria para este evento poderia ser classificado como de marginal a crítica (tabela 2.5). Porém como no caso anterior uma análise precisa deste impacto em relação ao meio ambiente, seria necessário uma equipe multidisciplinar.

Critério 2: Os resultados indicam evento anormal para a classe D de estabilidade atmosférica, pois a exposição ao HF é inferior ao IDLH a partir de 350 m e a incorporação de urânio inferior a $10 \cdot 10^{-6}$ kg a partir de 500 m. Na classe F de estabilidade atmosférica, são atingidos níveis de exposição ao HF superiores ao IDLH a distâncias de até 1600 m, caracterizando acidente. A incorporação de urânio é inferior a $10 \cdot 10^{-6}$ kg a partir de 960 m do ponto de liberação.

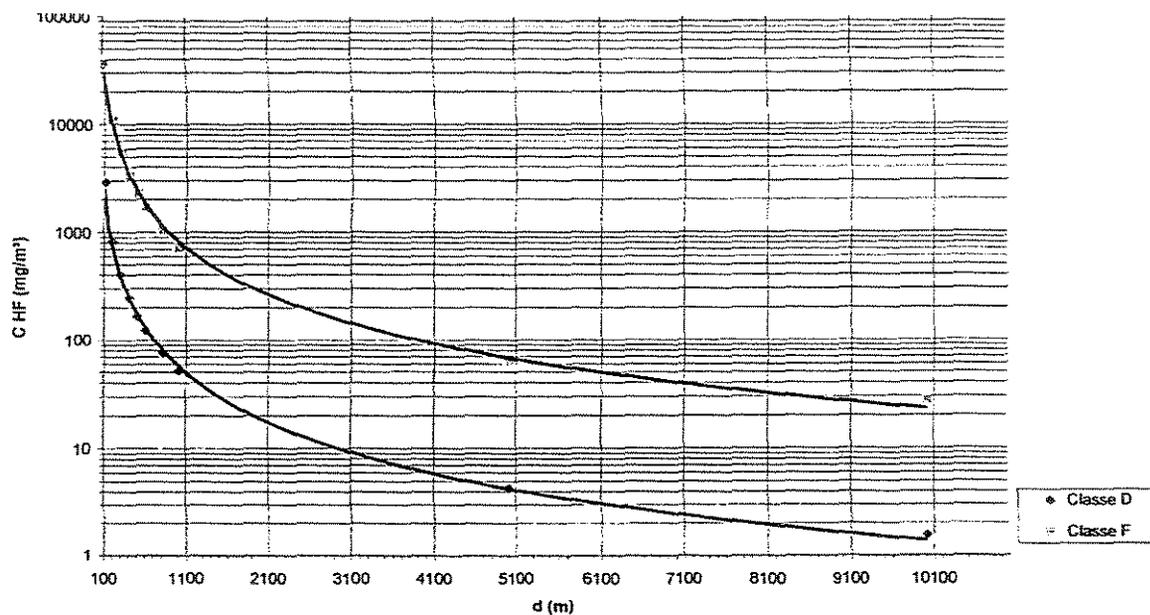


Figura 5.1: Caso B1 – Concentração de HF (mg/m^3) em função da distância para as classes de estabilidade atmosférica Pasquill D e F

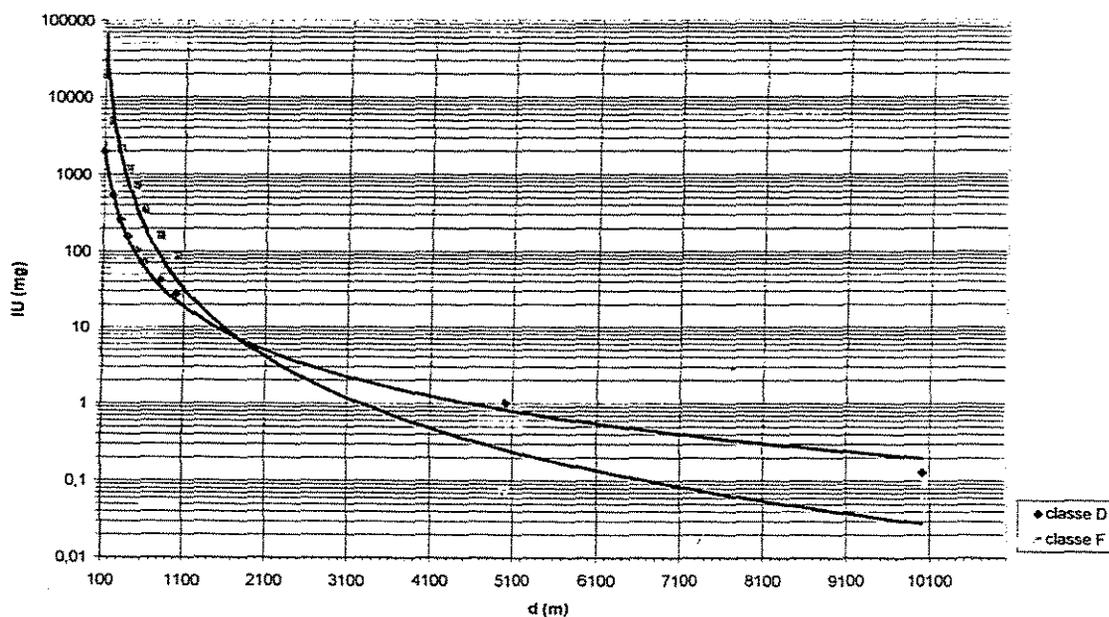


Figura 5.2: Caso B1 – Incorporação de urânio de U (mg) em função da distância para as classes de estabilidade atmosférica Pasquill D e F

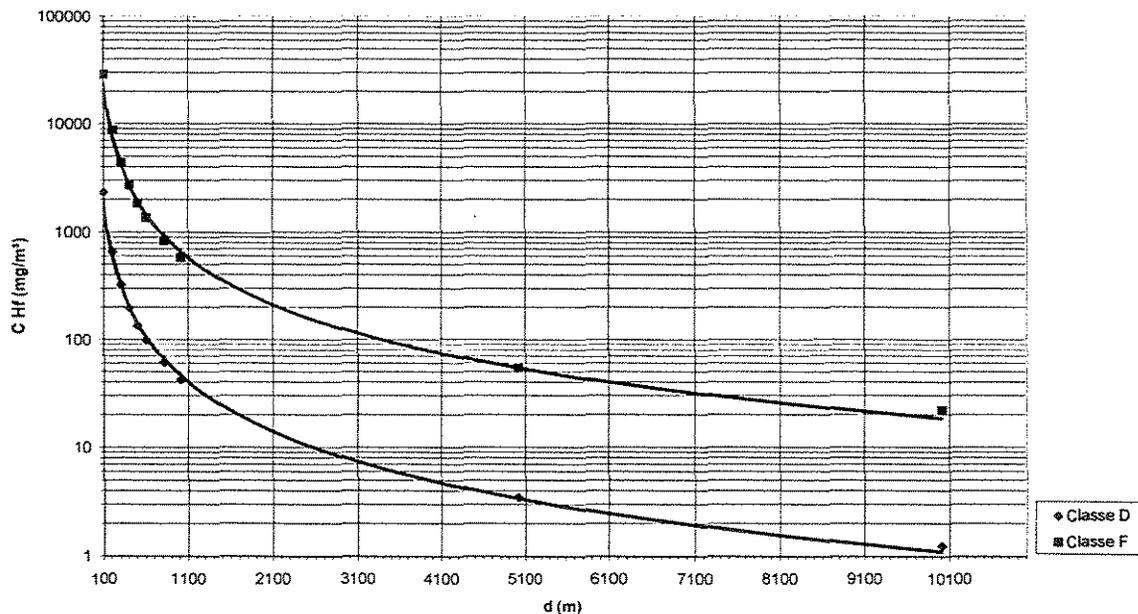


Figura 5.3: Caso B2 – Concentração de HF (mg/m^3) em função da distância para as classes de estabilidade atmosférica Pasquill D e F

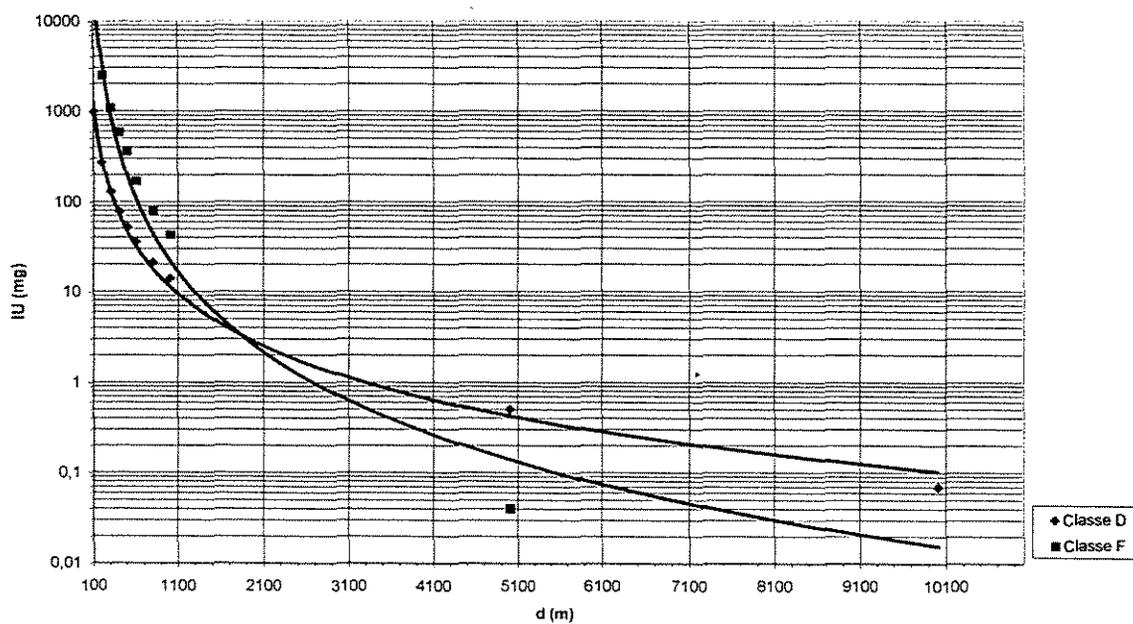


Figura 5.4: Caso B2 – Incorporação de urânio (U) (mg) em função da distância para as classes de estabilidade atmosférica Pasquill D e F

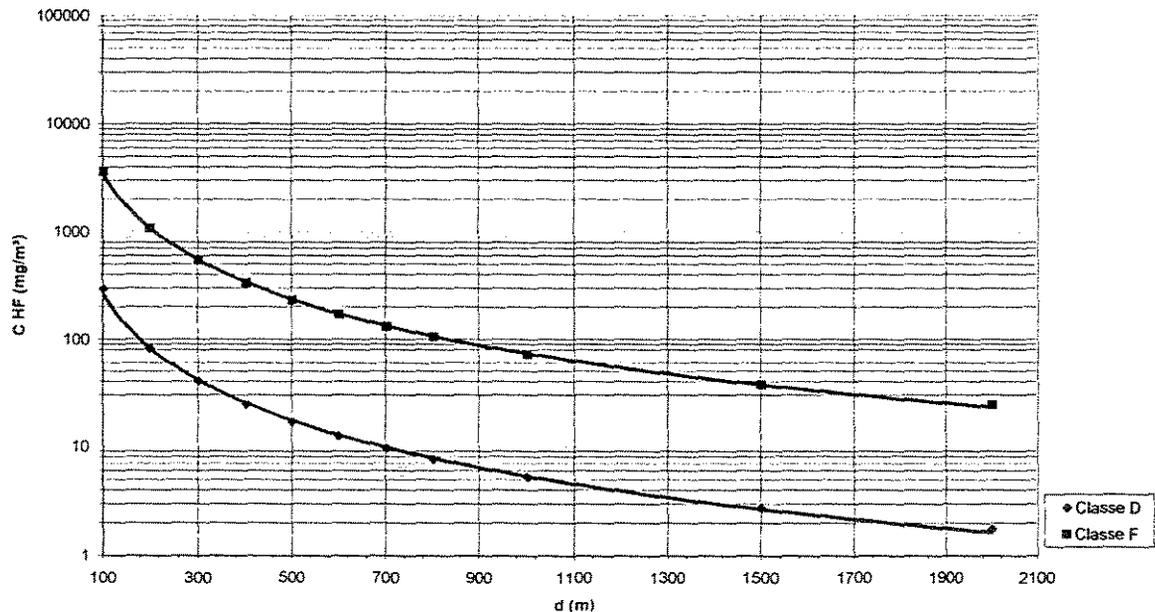


Figura 5.5: Caso B3 – Concentração de HF (mg/m^3) em função da distância para as classes de estabilidade atmosférica Pasquill D e F

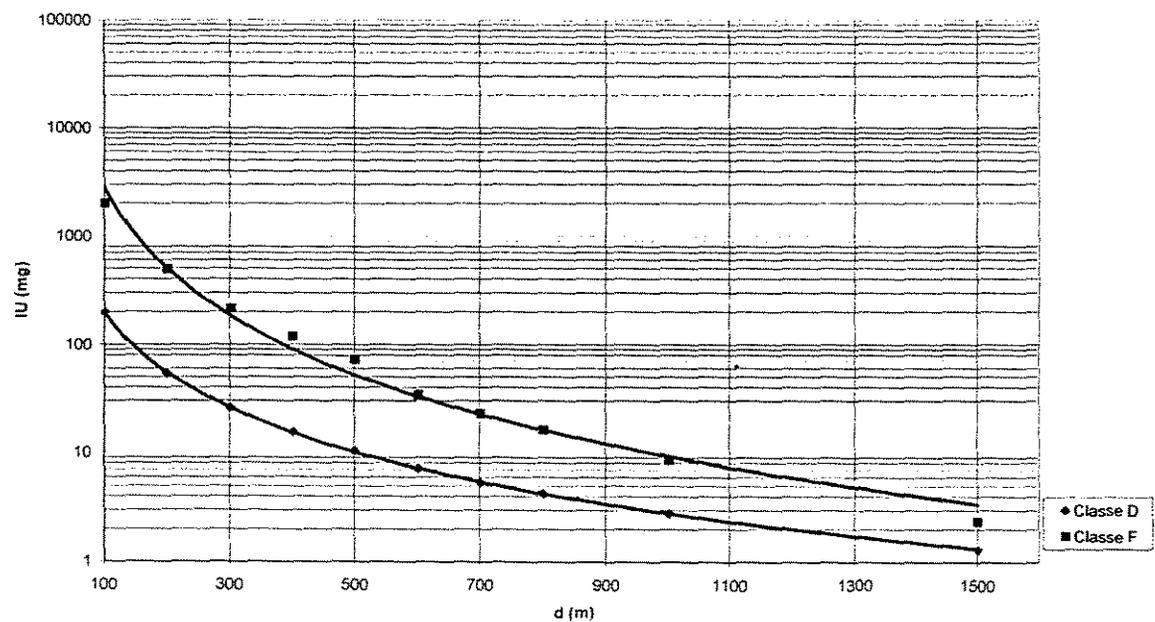


Figura 5.6: Caso B3 – Incorporação de urânio (U) (mg) em função da distância para as classes de estabilidade atmosférica Pasquill D e F

5.5.1.2 - Avaliação Quantitativa do Caso C

Neste caso considera-se a ruptura do cilindro 48 Y, a céu aberto, contendo cerca de 13.334 kg de UF₆ líquido, que vaporiza rapidamente e reage com vapor d'água formando 4558,93 kg de urânio e de 1500 kg de HF.

Este cenário é similar ao B1, mas foi analisado por tratar-se de um evento que realmente ocorreu na instalação em estudo em 04/01/86 (NRC, 1986).

As figuras 5.7 e 5.8 mostram os resultados do caso C, que além das condições propostas para os cenários do caso B, considerou-se também a classe de estabilidade atmosférica Pasquill C (velocidade de vento (u) igual a 11 m/s), condições prováveis no dia que ocorreu o acidente (NEA, 1993).

Critério 1: De acordo com os resultados apresentados nas figuras 5.7 e 5.8, as conseqüências toxicológicas são classificadas como:

- Marginal em relação a concentração de HF, condição de estabilidade atmosférica classe C, pois a exposição referente a esta substância no local do vazamento (Área 1) é superior ao GRUPO 1.
- Crítica em relação a incorporação de urânio, classe C de estabilidade atmosférica, pois a concentração de tal composto para indivíduos do público (Área 3) é maior que o valor do GRUPO 2.
- Crítica, classe D de estabilidade atmosférica, pois a concentração de HF e a incorporação de urânio nos limites da propriedade (Área 2) são superiores aos valores do GRUPO 1.
- Catastrófica, classe F de estabilidade atmosférica, pois a concentração de HF e a incorporação de urânio para indivíduos do público (Área 3) superam os valores do GRUPO 1.

Analisando os impactos sobre o meio ambiente, a categorias de classificação para o evento poderia ir de marginal a catastrófica (tabela 2.5), pois ocorre liberações de quantidades indesejáveis de contaminantes para o meio ambiente, que resultaria em

contaminação de ar e solo. Para a classe F de estabilidade atmosférica as conseqüências são as piores em comparação as outras classes se estabilidade analisadas, pois é uma condição que não favorece a dispersão de poluentes. Uma análise mais detalhada da severidade do impacto, seria necessário uma equipe multidisciplinar e referências de contaminação mais precisas do que as disponíveis (HANNAMAN et al., 1995).

Critério 2: Considerando a classe de estabilidade D, as concentrações de HF são inferiores aos níveis estabelecidos a partir de 2000 m e a incorporação de urânio a partir de 1300 m do ponto de liberação, classificando o caso como acidente. Na condição F, observa-se também acidente, porém com conseqüências maiores, pois os valores das concentrações de HF tornam-se menores do que o nível de referência a partir de 10000 m e a incorporação de urânio é inferior a 10.10^{-6} kg a partir de 1600 m. Para a classe C, a concentração de HF é inferior ao IDLH a 300 m do ponto de liberação e a incorporação de urânio é menor do que 10.10^{-6} kg a partir de 700 m, caracterizando evento anormal.

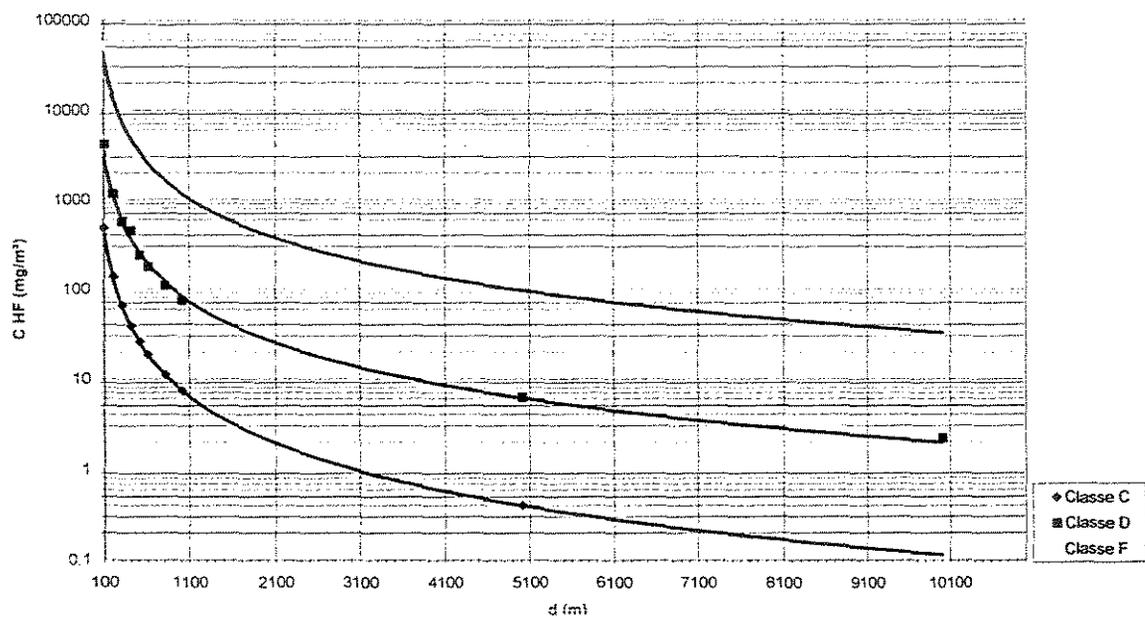


Figura 5.7: Caso C – Concentração de HF (mg/m^3) em função da distância para as classes de estabilidade atmosférica Pasquill C, D e F

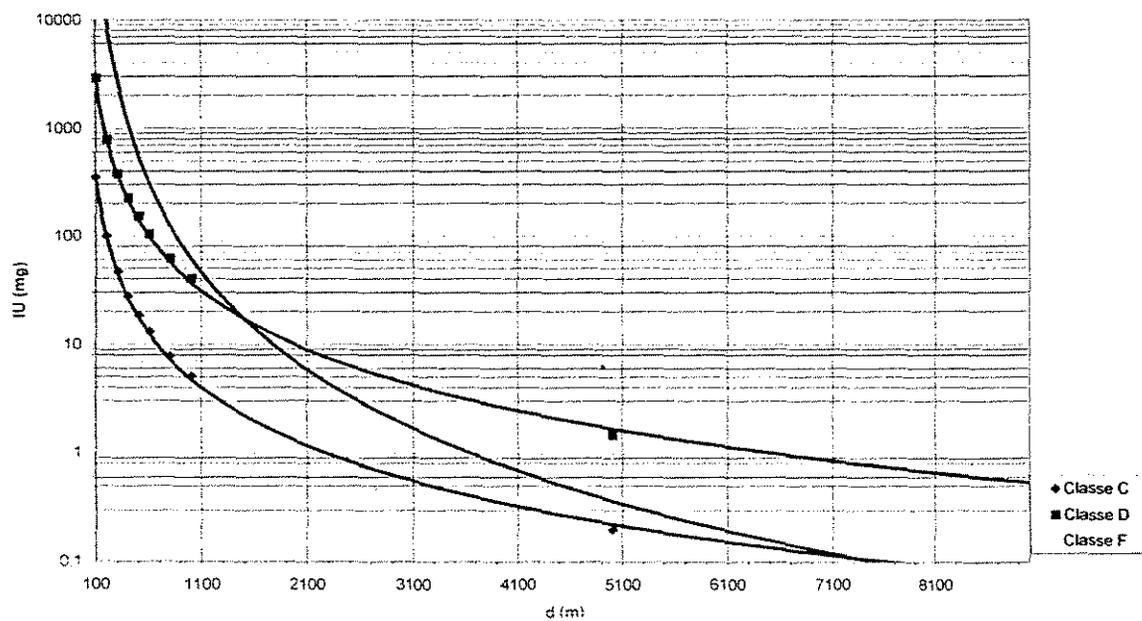


Figura 5.8: Caso C – Incorporação de urânio (U) (mg) em função da distância para as classes de estabilidade atmosférica Pasquill C, D e F

5.5.1.3 – Construção da Matriz de Risco

Como já mencionado no Capítulo 2 (item 2.3.2), após se identificar os perigos existentes em um processo ou em uma instalação em estudo, centenas de impactos terão sido também identificados. Uma dificuldade a ser vencida seria identificar entre os impactos, a prioridade ou ordem de execução das avaliações das conseqüências. Uma ferramenta denominada “Matriz de Risco” tem se revelado uma ferramenta interessante para priorizar os impactos, com base nos riscos que os mesmos apresentam (MOURA, 2002).

Neste trabalho, como já mencionado no item 5.4 deste capítulo, foi realizado somente análise quantitativa de conseqüências de liberações de UF₆. Este tipo de evento se enquadra na 3ª lista de registro criada para impactos ambientais, da qual fazem parte situações de emergências, incidentes, acidentes, ou seja, condições imaginadas e modeladas, com alguma probabilidade de ocorrência. Com o objetivo de verificar como se enquadraria este tipo de evento em relação a prioridade para análise de conseqüências em uma avaliação de perigos, construiu-se a “Matriz de Risco” para os casos de liberação de UF₆.

Uma Matriz de Risco é construída ao se combinar dados de gravidade das conseqüências com os de freqüência ou probabilidade de ocorrência (figura 2.1). Para o caso específico considera-se a probabilidade como sendo a referência para a construção da Matriz.

Tendo como base a Análise Histórica de Acidentes (Anexo V), verifica-se que este evento tem a probabilidade de ocorrer várias vezes ao longo da operação deste tipo de instalação, sendo classificada no nível B de probabilidade de ocorrência (tabela 2.9) podendo causar na maioria das vezes ferimentos graves até morte, elevada poluição, danos grandes no sistema ou no meio ambiente, sendo assim categoria II de gravidade (tabela 2.8).

Observando-se a figura 5.9 verifica-se que este evento apresenta um efeito crítico, valor obtido na Matriz de risco superior a 9, com prioridade 1 para análise de conseqüências.

Frequência ou Probabilidade						
A	5	5	10	15	20	
B	4	4	8	12	16	
C	3	3	6	9	12	
D	2	2	4	6	8	
E	1	1	2	3	4	
	x	1	2	3	4	
		IV	III	II	I	
		Gravidade				

Figura 5.9: Matriz de Risco para liberações de UF₆

5.5.1.4 – Resumo dos Casos Analisados

Os resultados dos casos analisados estão resumidos na tabela 5.1, segundo os critérios 1 e 2 definidos nas tabelas 2.2, 2.3, 2.5 e I.5.

Critério 1

O critério 1 é o mais abrangente na análise dos impactos sobre a saúde humana pois envolve a avaliação de conseqüências em três áreas distintas: na área de ocorrência do vazamento (Área 1), no sítio (Área 2) e na área externa aos limites de propriedade (Área 3). Além disso, este critério atribui as seguintes categorias aos eventos: desprezível, marginal, crítica e catastrófica.

As conseqüências toxicológicas dos casos B1, classe D de estabilidade atmosférica e dos casos B1, B2 e C, considerando-se a classe F de estabilidade atmosférica, são classificadas como catastrófica, pois representam situações em que os indivíduos do público (Área 3) estão submetidos a concentrações de HF ou incorporações de urânio superiores aos valores do GRUPO 1 (IDLH).

As conseqüências toxicológicas não são desprezíveis porque em todos os casos analisados as concentrações de HF e de urânio na área do vazamento (Área 1) são superiores aos valores do GRUPO 1.

Deve-se notar, entretanto, que o caso B1 é ultra conservativo, pois não considera a atuação dos filtros HEPA presentes no sistema de exaustão, despreza o confinamento exercido pelo próprio prédio e não inclui os fenômenos de elevação da pluma e de deposição de particulados de UO_2F_2 no piso do edifício. Se forem adicionadas a esses fatores as baixas taxas de falhas das tubulações de UF_6 e dos filtros (cerca de 1.10^{-6}) (LEES, 1996), além do fato de que os operadores da instalação poderiam atuar para isolar a área afetada pelo vazamento, o caso B1 pode ser considerado não crível. Conclui-se, portanto, que o risco de B1 associado aos indivíduos do público é praticamente desprezível.

O critério 1 também inclui a classificação dos impactos sobre o meio ambiente. As conseqüências ambientais dos casos analisados são classificados de crítico a catastrófico, pois representam situações que seriam liberadas para a atmosfera quantidades apreciáveis de contaminantes. Como já mencionado, para uma análise mais precisa em relação aos impactos ambientais, seria necessário uma equipe multidisciplinar e parâmetros ambientais mais precisos do que os disponíveis.

Critério 2

O critério 2 exige somente a análise das conseqüências toxicológicas sobre a saúde dos indivíduos do público (Área 3) de acordo com o documento NUREG 1391 (USNRC, 1991). Esse critério possui apenas duas categorias na classificação das conseqüências: evento anormal ou acidente.

Verifica-se, portanto, que as condições mais desfavoráveis de liberação correspondem a condição F de estabilidade atmosférica, pois para todos os casos analisados as conseqüências são classificadas como acidente, representando situações em que os indivíduos do público estão submetidos a concentração de HF ou incorporação de urânio superiores aos valores de referência até amplas distâncias dos limites da instalação.

O caso B3, ilustra o quanto a adoção de medidas atenuadoras de impacto (como por exemplo, a atuação dos filtros HEPA dos sistema de exaustão da área atingida) podem trazer benefícios à instalação e diminuem os riscos aos indivíduos do público.

Dos resultados obtidos pode-se constatar que os critérios 1 e 2 são coerentes, pois existem equivalências entre a categoria catastrófica ou crítica do critério 1 e a classificação acidente do critério 2.

Tabela 5.1 Resumo da avaliação dos casos de liberação de UF₆

	Caso B1		Caso B2		Caso B3		Caso C		
Massa de urânio liberada (kg)	3138,6		1560,3		313,86		4558,93		
Massa de HF liberada (kg)	1057		845,65		105,7		1500		
Estabilidade atmosférica	Classe D	Classe F	Classe D	Classe F	Classe D	Classe F	Classe C	Classe D	Classe F
Distância a exposição de HF igual a $35 \cdot 10^{-6}$ kg/m ³ (IDLH) (m)	1600	7600	Limetes da propriedade	6700	350	1600	300	2000	10000
Critério 1 Exposição ao HF	Catastrófica	Catastrófica	Crítica	Catastrófica	Marginal	Crítica	Marginal	Crítica	Catastrófica
Critério 2 Classificação do evento a exposição de HF	Acidente	Acidente	Evento anormal	Acidente	Evento anormal	Acidente	Evento anormal	Acidente	Acidente
Distância a incorporação de urânio igual a $10 \cdot 10^{-6}$ kg (m)	1400	1500	Limetes da propriedade	1300	500	960	700	1300	1600
Critério 1 Incorporação de urânio	Catastrófica	Catastrófica	Crítica	Catastrófica	Marginal	Crítica	Crítica	Crítica	Catastrófica
Critério 2 Classificação do evento a incorporação de urânio	Acidente	Acidente	Evento anormal	Acidente	Evento anormal	Evento anormal	Evento anormal	Acidente	Acidente

CAPITULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

6.1 - Conclusões

Neste trabalho foi proposto e aplicado um método para a avaliação de riscos e impacto ambiental em instalações químicas. O método foi aplicado a uma planta de produção de hexafluoreto de urânio (“Kerr Mc Gee Sequoyah Hexafluoride Plant”).

O método empregado consiste em uma adaptação do método proposto pelo Banco Mundial e demonstrou satisfatória aplicabilidade para a avaliação de riscos da instalação. Foi também utilizado um programa computacional, o CONV_ACI, como ferramenta acessória para realizar a avaliação das conseqüências dos casos de liberações propostos. Através da sistemática aplicada foi possível identificar os eventos mais relevantes e quantificá-los.

Quanto a instalação analisada, verificou-se que:

- 1) Os perigos maiores estão associados a vazamentos de substâncias químicas, incêndios, explosões e contaminação do solo por problemas na manta de impermeabilização da bacia de retenção de rejeitos.
- 2) Neste trabalho foi analisado quantitativamente, somente, as conseqüências de liberações acidentais de UF₆ como já explicado no Capítulo 5 (item 5.4).
- 3) As liberações de UF₆, de acordo com a ferramenta “Matriz de Risco”, apresenta um efeito crítico se ocorrer, com prioridade 1 para análise de conseqüências. Esta ferramenta se mostra realmente eficiente no auxílio de priorizar quais avaliações de conseqüências a realizar. Para as liberações de UF₆ é descrita a construção da Matriz de Risco no Capítulo 5 (item 5.5.1.3)

- 4) As conseqüências das liberações para a atmosfera estão relacionadas com as condições meteorológicas como velocidade do vento e classificação da estabilidade atmosférica. Estas condições interferem diretamente na taxa de vaporização e também na dispersão da nuvem formada. Assim, o conhecimento da climatologia local é essencial para uma análise realista.
- 5) Verifica-se que, para a situação mais provável (caso B3), as conseqüências para os indivíduos do público, considerando classe D de estabilidade atmosférica são marginais.
- 6) As barreiras físicas representadas pelo prédio, filtros e lavadores de gases constituem meios eficazes para contenção de vazamentos de UF₆, podendo reduzir em até 90% a liberação para a atmosfera.
- 7) Observando-se o resultado do caso C, evento real, quando se considera a classe C de estabilidade atmosférica, as conseqüências toxicológicas para os indivíduos do público são irrelevantes.

Quanto ao programa computacional, constatou-se que:

- 1) O programa computacional utilizado apresenta algumas restrições, pois não possui recursos que incluem a influência da topografia local, prédios próximos e alterações nas condições meteorológicas durante a ocorrência do acidente.

6.2 – Sugestões para Próximos Trabalhos

Como sugestão para próximos trabalhos sobre análise de riscos e impacto ambiental em instalações de processamento químico, sugere-se:

- 1) Analisar quantitativamente os demais perigos identificados, como liberações de outras substâncias químicas, casos de incêndios e explosões utilizando parâmetros mais precisos e consistentes para avaliação do impacto ambiental.
- 2) Analisar casos que envolvem as próprias emissões do processo considerando situações mais realistas, pois neste trabalho foram analisados casos muito conservativos.
- 3) Aplicar o método a outras instalações químicas.

- 4) Utilização de ferramentas de apoio para avaliação de consequências, mais sofisticadas com recursos que incluem a influência da topografia local, prédios próximos e alterações nas condições meteorológicas durante a ocorrência do acidente.
- 5) Aplicar a Avaliação do Ciclo de Vida, para uma Análise Ambiental e Econômica.
- 6) Utilizar o trabalho como referência na elaboração do RIMA (Relatório de Impacto Ambiental) e EIA (Estudo de Impacto Ambiental) para instalações como esta.

CAPITULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1989-1990. Ohio, 1989.

AICHE; American Institute of Chemical Engineers. Ammonia Safety Plan,. vol 27, 1986.

AIHA; American Industrial Hygiene Association. Concepts and Procedures for Development of Emergency Response Planning Guideline (ERPGs), 1989.

BAUER, P. E.; MACIEL, R. Metodologias de Avaliação do Impacto Ambiental para o Projeto e a Operação de Processos de Processos Químicos. In: ENPROMER'99 – II Congresso de Engenharia de Processos do MERCOSUL, 1999, Florianópolis – Santa Catarina – Brasil.

BODEAU, D. J. et al. Data base for radiation events in the commercial nuclear fuel cycle 1950-1978. Argonne: Argonne National Laboratory, 1981.

BRYNDA, W. J. et al. Division of Operational Environmental Safety, BNL 50831-II, United States Department of Energy. May, 1978.

BS 7750 – BRITISH STANDART 7750, Specification for Environmental Management Systems, 1994.

CARSON, P. A.; MUNFORD, C. J. An analysis of incidents involving major hazards in the chemical industry. Journal of Hazard Materials, v.3, issue 2, p. 149-165, 1979.

CETESB; Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Programa de Prevenção e Gerenciamento de Riscos no Estado de São Paulo, 1993.

CETESB; Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Manual de Orientação para a Elaboração de Estudos de Análise de Riscos. São Paula, 1994a.

CETESB; Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Técnicas de Análise de Riscos: Métodos Qualitativos e Quantitativos. São aula, 1994b.

CETESB; Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Propriedades e Riscos Intrínsecos às Substâncias Químicas. São Paulo, 1995.

CICCO, 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.

CLIFFORD, A.F.; BEACHELL, H. C.; JACK, W. M. J. Inorg. Nucl. Chem. 24, 1549 (1962).

CNEN; Comissão Nacional de Energia Nuclear. Usina de Enriquecimento de Gronau; Descrição simplificada. 2ª Edição Revisada e Complementada; Tradução de A.C. Camargo. 1980.

CONV_ACI: Programa computacional, desenvolvido por Leslie de Molnary, do setor RT do IPEN. 1990.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications. New Jersey: Prentice Hall, 1990.

DEPARTAMENT D'INTERIOR, DIRECCIÓ GENERAL D'EMERGÈNCIES I SEGURETAT CIVIL. Protección civil: Que es la protección civil. Generaliat de catalunya: 2000. Disponível em: <<http://www.fut.es/~protciv/ewelcome.html>>. Acesso em: 05/08/2004.

DOUGLAS, J. M. Process Synthesis for Waste Minimization. Ind. Eng. Chem. Res., vol.31, n.1, p. 238-243, 1992.

EIMUTS; KONICEK, Atmospheric Environment. vol 6. Great Britain: Pergamon Press, 1972.

EPA, Environmental Protection Agency. Non-EPA data bases and softwares. Washington: 2000 a. Disponível em: <http://www.epa.gov/swercepp/da-epds.html>> Acesso em: 20/08/2004.

EPA, Environmental Protection Agency. Chemical accident histories and investigations. Washington: 2000 b. Disponível em: <http://www.epa.gov/swercepp/acc-his.html>. Acesso em: 15/09/2004.

FERRÃO, P. C. Introdução à Gestão Ambiental: A Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos. Lisboa: IST Press, Coleção Ensino da Ciência e Tecnologia, 1998.

HANNAMAN, G. W.; KRYSKAS, P. and MAHAN, J. A. Qualitative Methods for Assessing Risk, ASME, USA, 1995.

HILALY, A. K.; SIKDAR, S. K. Pollution Balance: A New Methodology for Minimizing Waste Production in Manufacturing Process. J. Air Easte Manage. Assoc., vol. 44, p. 1303-1308, 1994.

IAEA; International Atomic Energy Agency. Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting. Safety Guides n° 50 - SG - S3, Vienna, 1980.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. Manual de amônia. Rio de Janeiro: IBP, 1977. 122p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. Manual de ácido fluorídrico. Rio de Janeiro: IBP, 1978. 135p.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON URANIUM HEXAFLUORIDE HANDLING, 2, 1991, [S.1]: Proceedisngs... Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1991.

KIRK – OTHMER. Encyclopedia of Chemical Technology. vol 10. 3rd edition, 1978.

KIRK - OTHMER; Encyclopedia of Chemical Technology. vol 15. 3rd edition, 1978.

KLETZ, T. A. Inherently Safer Plants. Plant/Operations Progress, vol.4, n. 3, p. 164-167, 1985b.

KLETZ, T. A. Eliminating potencial process hazards. Chemical Engineering, v.92, n. 7, p. 48-68, Apr., 1985b.

LAMARSH, A. Indroduction to Nuclear Engineering; Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1975.

LANNOY, A.; GOBERTE, T. Evaluations on hazard from industrial activities near nuclear power plants: deterministic and probabilistics studies. Nuclear Engineering and Design, V.57, n., p. 207-214, Apr. 1980.

LEES, F. P. Loss Prevention in the Process Industries Hazard Identification, Assessment and Control. 2.ed. Oxford: Butterworths-Heinemann, 1996. 3v.

LEWIS, D. J. Unconfined vapour-cloud explosions: historical perspective and predictive method based on incident records". [S.I.]: The Energy Combustion Science, 1980.

LINNHOFF, B. et al. A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy, IChemE, Rugby, U. K. 1982.

MALLICK, S. K. et al. A Pollution Reduction Methodology for Chemical Process Simulators. Ind. Eng. Chem. Res., vol. 35, n. 11, p. 4128-4138, 1996.

MEYER. Chemistry of Hazardous Materials. New Jersey: Prentice – Hall, 1977.

MIL-STD-882C, Military Standard-System Safety Program Requirement. Department of Defense, USA.

MOURA, L. A. A. de. Qualidade e Gestão Ambiental. 3ª edição. São Paulo: Juarez de Oliveira, 2002. 331p.

NATIONAL FIRE ACADEMY; The Chemistry of Hazards Materials, Student Manual, USA, 1983.

NBR ISO 14.001, Sistemas de Gestão Ambiental – Especificação e Diretrizes para uso. ABNT, Out 1996.

NEA; Nuclear Energy Agency. The Safety of the Nuclear Fuel Cycle, 1993.

NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards. HHS Publication, 1985.

NRC; Nuclear Regulatory Commission. Sequoyah Uranium Hexafluoride Plant (DOCKET Nº 40 8027): Final Environmental Statement; NUREG 75 007, Feb 1975.

NRC; Nuclear Regulatory Commission. Assessment of the Public Health Impact from the Accidental Release of UF₆ at the Sequoyah Fuel Corporation Facility at Gore. Oklahoma; NUREG - 1189, vol.1, 1986.

NRC; Nuclear Regulatory Commission. A Regulatory Analysis on Emergency Preparedness for Fuel Cycle and Other Radioactive Material Licensees. NUREG - 1140, 1985.

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.

ORO (Rev 6); Uranium Hexafluoride: Manual of Good Handling Practices. Oak Ridge, TN, USA, oct 1991.

PINTO, F. C. Técnicas e aplicações da análise da confiabilidade humana em instalações nucleares. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 1995. 193 p. Dissertação (Mestrado)

PORTO, M. S. et al. Grandes e graves. Revista Proteção, 1998. (edição 94, 10 anos). CD-ROM.

PUBLISHING COMPANY; Risk analysis of six potentially hazardous industrial objectct in the Rijimond area, a pilot study: a report to the Rijimond Public Authority. [S.l.]: D. Reidel. 1982.

RISK WORLD. Risk-related software, 2000. Disponível em: <http://riskworld.com/software/SW5S001.htm> Acesso em 25/06/2004.

ROYSTON, D. et al. The Production of Fluorine. Chemical Thechnolog. Division, Australian Atomic Energy Commission, 1977.

SAX, N. I. Dangerous Proporpeties of Industrial Materials. 6.ed. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1985.

SIMAN-TOV, M. et al. Scenarios and Analytical Methods for UF₆ Releases at NRC Licensed Fuel Cycle Facilities. Oak Ridge, TN, USA, NUREG/CR-3139, jun 1984.

SOTO, SAAD, FANTAZZINI; Riscos Químicos. Ministério do Trabalho, Fundacentro, 1995.

SOUZA, E. A. O treinamento industrial e a gerência de riscos: uma proposta de instrução programada. Florianópolis: Escola de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, 1995. 126 p. Dissertação (Mestrado)

STEFANIS, S. K. et al. Minimizing the environmental Methodology. Computers & chemical Engineering, vol. 19 (S), S39-S44, 1995.

TIXIER, J. et al. Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. Journal of loss prevention in the process industries, vol.15, p. 221-303, 2002

URENCO: Nederland te Almelo v.o.f. Het Effect Van URENCO Nederland Op HET Milieu, Drienemansweg 1, Almelo, Maart, 1993.

USNRC; US Nuclear Regulatory Commission. Code of Federal Regulations 10 CFR Part 20; Standards for Protection Against Radiation.

USNRC; US Nuclear Regulatory Commission (USNRC). A preliminary evaluation of the economic risk cleanup of nuclear material licensee contamination incidents. Washington, 1987. (NUREG/CR-4825)

USNRC; US Nuclear Regulatory Commission. A regulatory analysis on emergency preparedness for fuel cycle and other radioactive materials licensees. Washington, 1989. (NUREG-1140)

USNRC; US Nuclear Regulatory Commission. Chemical Toxicity of Uranium Hexafluoride Compared to Acute Effects of Radiation. NUREG 1391, 1991.

USNRC; US Nuclear Regulatory Commission. Safety Evaluation Report for the Claiborne Enrichment Center Homer. Louisiana, 1994.

USNRC; US Nuclear Regulatory Commission. Report to congress on abnormal occurrences. Washington, 1995. (NUREG-0090)

VASCONSELOS, V. Aplicação da metodologia da árvore de falhas na análise de risco em sistemas complexos. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 1984. 143p. Dissertação (Mestrado)

WASH- 1284; US ATOMIC ENERGY COMMISSION FUEL and Materials Directorate of Licensing. April 1974.

WHO: World Health Organization; Ammonia: Health and Safety Guide. Geneva, 1990.

WORLD BANK; Manual of Industrial Hazard Assessment Techniques. London, October 1985.

WSRC, Westinghouse Savannah River Company. Toxic chemical Hazard Classification and Risk Acceptance Guidelines for Use in DOE Facilities (U), Document Number WSRC-MS-92-206, December, 1994.

ANEXO I

Propriedades do UF₆

Propriedades Físicas

À temperatura ambiente, o UF₆ apresenta-se como um sólido branco. Como este é o único composto do urânio passível de ser mantido na fase gasosa através do controle da temperatura e da pressão, é adequado o seu uso em plantas de enriquecimento isotópico. Em pressão atmosférica ($1,01 \cdot 10^5$ Pa), ele sublima na temperatura de 56,4° C. As principais propriedades físicas do UF₆ estão listadas na tabela I.1.

As principais propriedades físicas do UF₆ de interesse para os processos utilizados em instalações do ciclo do combustível, são duas:

1. A variação do ponto de sublimação em função da pressão, ou seja, para valores de pressão menores que a pressão atmosférica, o UF₆ sublima em temperaturas mais baixas. Essa característica possibilita o uso do UF₆ gasoso nas cascatas de enriquecimento.
2. O alto valor da expansão volumétrica do UF₆ na mudança de estado de sólido para líquido, ou seja, o decréscimo na densidade provocando o aumento de volume. Essa característica deve ser considerada na determinação da quantidade de UF₆ que pode ser armazenada de forma segura em um cilindro. Se um cilindro for completo com UF₆ sólido, quando aquecido e liquefeito o produto, poderá haver a ruptura do cilindro devido a expansão volumétrica do líquido (qualquer aquecimento adicional causará ao líquido confinado o desenvolvimento de pressões hidráulicas, o que pode causar danos ao cilindro).

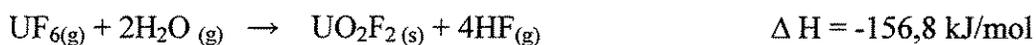
Tabela I.1: Propriedades físicas do UF₆

Calor de sublimação (64°C)	137500 J/kg
Calor de fusão (64°C)	54167 J/kg
Calor de vaporização (64°C)	83333 J/kg
Pressão crítica	4,6.10 ⁶ Pa
Temperatura crítica	230.2°C
Ponto triplo	64°C
Temperatura de sublimação (1,01.10 ⁵ Pa)	56,4°C

Propriedades Químicas do UF₆

Embora o UF₆ seja um composto estável, ele possui algumas propriedades que o tornam de manipulação complexa. O UF₆ é altamente reativo com água, éter e álcool formando produtos estáveis.

A reação do UF₆ com água produz UO₂F₂ (fluoreto de uranila) e HF (ácido fluorídrico), conforme a equação a seguir:



Pelo valor da variação de entalpia dessa reação, conclui-se que ela é altamente exotérmica.

Cada 1 kg de UF₆ contém 0,68 kg de urânio e 0,32 kg de íons fluoreto, produzindo 0,23 kg de HF quando reage com a umidade do ar.

A reação do UF₆ gasoso com hidrocarbonetos, como óleos e graxas, apresenta como produto um resíduo preto de composto de urânio e carbono. Se o UF₆ estiver no estado líquido, essa reação é rápida e pode ser violenta em temperaturas elevadas, havendo risco de explosões no interior dos cilindros. Logo, alguns cuidados devem ser tomados para não permitir a entrada de óleos hidrocarbonados em equipamentos do processo e cilindros.

Toxicidade do UF₆ e seus produtos de hidrólise

O UF₆ quando liberado para a atmosfera, reage rapidamente com a água, formando os produtos UO₂F₂ e HF. Os compostos de urânio (UF₆ e UO₂F₂) exibem ambas as toxicidades química e radiológica, enquanto que o HF apresenta somente a toxicidade química.

Os compostos de urânio UF₆ e UO₂F₂ são, considerados solúveis (classe D) (ICRP,1978), quando inalados, passam rapidamente dos pulmões para a corrente sanguínea.

A toxicidade química do urânio supera a radiológica para qualquer nível de enriquecimento (para exposições agudas), pois sendo o urânio fracamente radioativo e altamente solúvel, é rapidamente transportado para órgãos mais sensíveis.

O efeito tóxico mais importante do urânio é o dano aos rins, podendo ocasionar uma perda da capacidade funcional, afetando também os vasos sanguíneos em todo o corpo. A permeabilidade capilar, a pressão sanguínea e edema aumentam e a capacidade de coagulação diminui. O urânio pode danificar as membranas capilares e também danificar o fígado e os tecidos musculares. Seu efeito no sistema nervoso é semelhante aos efeitos de outros metais pesados.

O limiar de dano renal é $0,058 \cdot 10^{-6}$ kg-U/kg no indivíduo, quantificado através do exame de urina, indicando alterações estruturais nos rins. Essas mudanças são transientes, pois a composição da urina logo volta ao normal. A norma (USNCR) limita a incorporação aguda de urânio solúvel para trabalhadores baseada na toxicidade química em $9,6 \cdot 10^{-6}$ kg por semana. O documento NUREG 1391 (USNRC, 1991) arredondou esse valor para $10 \cdot 10^{-6}$ kg, sendo este um valor para ser usado como referência para a determinação de critérios de projeto, classes de segurança e escolha do local. A incorporação aguda dessa quantidade de urânio solúvel, em seres humanos, não apresenta efeitos a longo prazo (long-term effects) ou curto prazo (short-term effects), conforme descrição na tabela I.2.

Toxicidade do ácido fluorídrico

O HF é altamente corrosivo e exposições moderadas no ar, podem causar queimaduras na pele, irritações do aparelho respiratório e da membrana conjuntiva.

Exposições agudas podem causar a destruição dos brônquios e inchaço pulmonar, o que pode ser fatal. Quando aquecido, libera fumos altamente tóxicos.

Na tabela I.3 estão resumidos os efeitos devido à inalação do HF, os quais foram determinados através de experimentos com animais.

(NIOSH, 1985) estabelece uma concentração de HF no ar de $25 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$, ou seja 30 ppm (IDLH) como imediatamente perigosa a vida ou a saúde. Nesse documento consta a concentração de HF que pode ser tolerada por 1800 s (30 min) sem efeitos irreversíveis à saúde, mas não há valores para diferentes intervalos de tempo.

De acordo com o NUREG 1391, para tempos diferentes de 1800 s (30 min), a concentração equivalente ao valor IDLH de $25 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ é dada pela seguinte expressão:

$$C_{\text{HF}} = 25 \cdot (1800/t)^{1/2} \quad (\text{I-1})$$

onde:

C_{HF} = concentração de HF equivalente ao IDLH (10^{-6} kg/m^3)

t = tempo de exposição (s)

A tabela I.4 mostra as concentrações de HF equivalentes ao IDLH para vários períodos de exposição, calculadas a partir da equação I-1.

Tabela I.2: Efeitos adversos à saúde devido à inalação de urânio (U). Fonte: NUREG 1391 (USNRC,1991)

Efeitos	U(kg) por kg no indivíduo (kg-U/kg)	U(kg) em pessoa de 70 kg	U(kg) inalado por pessoa de 70kg
50% de letalidade	$1,63 \cdot 10^{-6}$	$114 \cdot 10^{-6}$	$230 \cdot 10^{-6}$
Limite para dano renal permanente	$0,30 \cdot 10^{-6}$	$21 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$
Limite para efeito ou dano renal transiente	$0,058 \cdot 10^{-6}$	$4,06 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-6}$
Nenhum efeito	$0,03 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$

Tabela I.3: Efeito da inalação de ácido fluorídrico (HF) em animais. Fonte: NUREG 1391 (USNRC,1991)

Concentração de HF (10^{-6} kg/m ³)	Efeitos
1500	Alguns animais morreram em 5 min (300 s) de exposição
100	Nenhum animal morreu em exposição de 30 min (1800 s) ou menos, mas houve danos
500	Todos os animais expostos por 15 min (900 s) ou mais apresentaram sinais de cansaço e mal estar
100	Pode ser tolerado por 5 h (18000 s) sem causar morte, mas causa irritação severa
50	Coelhos e porcos apresentam irritação na garganta e tosse após 5 a 15 min (300 a 900 s) de exposição
24	Tolerado por 41 h sem fatalidade, mas alguns animais perderam peso

Tabela I.4: Concentração de ácido fluorídrico (HF) equivalente ao valor do IDLH. Fonte: NUREG 1391 (USNRC,1991)

Tempo de exposição (s)	Concentração equivalente ao IDLH (10^{-6} kg/m ³)
60	137
120	97
300	61
600	43
900	35
1800	25
3600	18

Tabela I.5: Critério para classificação de liberações de UF₆

EVENTO	CONSEQUÊNCIA	CLASSIFICAÇÃO
Liberação de UF ₆	$C_{HF} < 25 \cdot (1800/t)^{1/2}$ ou $2 \cdot 10^{-6} < IU < 10 \cdot 10^{-6}$	Evento anormal
	$C_{HF} \geq 25 \cdot (1800/t)^{1/2}$ ou $IU \geq 10 \cdot 10^{-6}$	Acidente

IU: incorporação de U (kg)

t: tempo (s)

C_{HF}: concentração de HF (10^{-6} kg/m³)

ANEXO II

Propriedades do HF

Propriedades Físicas

O nome mais comumente usado é ácido fluorídrico, usa-se também o termo fluoreto de hidrogênio, preferencialmente para o produto anidro (KIRK – OTHMER, 1978).

O ácido fluorídrico anidro é um líquido incolor fumegante e corrosivo que produz queimaduras graves quando em contacto com a pele. Os seus vapores são muito irritantes à vista e às mucosas.

O produto anidro entra em ebulição a 19,5 °C, em fase líquida tem a mesma densidade da água sendo com ela miscível em todas as proporções.

O gás é mais leve que o ar (0,7) mas seus vapores são mais densos, se deslocando ao nível do solo, porque absorvem umidade.

Tabela II.1: Principais propriedades físicas do HF

Massa molecular	20,01
Ponto de fusão	-83,55°C
Ponto de ebulição à 101,3 kPa	19,54°C
Calor de vaporização no ponto de ebulição à 101,3 kPa	7493 J/mol
Calor de fusão	3931 J/mol
Calor de formação do gás HF à 25°C	-272,5 J/mol
Densidade do líquido à 0°C	1,002 g/cm ³
Densidade do líquido à 25°C	0,9576 g/cm ³
Densidade do vapor saturado à 25°C	3,553.10-3 g/cm ³
Temperatura crítica	188°C
Pressão crítica	6,480 MPa

Propriedades Químicas

A química do HF tem como base cinco características importantes:

- a elevada energia de ligação hidrogênio-flúor;
- a significativa energia das ligações secundárias hidrogênio-flúor;
- a ausência de estados de oxidação do flúor diferentes de -1;
- forte associação polimérica nos estados sólido, líquido e gasoso;
- e um caráter de ácido forte, uma aparente contradição com a baixa dissociação iônica em solução aquosa.

O HF na temperatura de 0°C e pressão atmosférica é um líquido incolor.

A molécula permanece íntegra mesmo em temperaturas elevadas. Devido à energia de formação e à sua capacidade calorífica e de seus elementos, é calculado que somente 40% da molécula do HF está dissociada em átomos de hidrogênio e átomos de flúor à 4000°C. Comparado ao N₂ e ao CO, o HF é a molécula diatômica mais estável.

Na fase gasosa, acima de 200°C, encontra-se o fluoreto de hidrogênio como um monômero e em temperaturas inferiores formam-se oligômeros: (HF)₂ até (HF)₆, os quais, em estado sólido, compactam-se para compridas correntes em forma de ziguezague. Embora estas ligações secundárias sejam fracas (cerca de 6 kcal/mol do HF (CLIFFORD, BEACHELL e JACK, 1962)) esta estrutura esclarece o ponto de ebulição alto (19,5°C) quando comparado aos demais halogenetos de hidrogênio e seja o gás mais imperfeito já estudado.

Toxicidade

A toxicidade do HF já foi abordada no Anexo I.

ANEXO III

Propriedades da Amônia Anidra

Propriedades Físicas

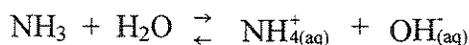
A amônia em temperatura ambiente e pressão atmosférica normal é um gás incolor, de cheiro acre, penetrante e de baixa densidade. Pode ser estocado e transportado como um líquido a alta pressão e temperatura ambiente (WHO, 1990).

Tabela III.1: Propriedades físicas da amônia anidra

Massa molecular	17,032
Ponto de ebulição à 101,3 kPa (1atm)	-33,4°C
Ponto de solidificação à 101,3 kPa	-77,7°C
Densidade do líquido no ponto de ebulição à 101,3 kPa	0,682 g/cm ³
Densidade do vapor no ponto de ebulição à 101,3 kPa	8,9.10 ⁻⁴ g/cm ³
Densidade relativa do vapor à 25°C	0,6
Temperatura crítica	133°C
Pressão crítica absoluta	11,4 MPa
Calor latente de vaporização no ponto de ebulição à 101,3 kPa	1371 kJ/kg
Calor de fusão	3,326 kJ/kg
Calor de formação do gás à 25°C, 101,3 kPa	2698, 2 kJ/kg

Propriedades Químicas

Em solução aquosa, o NH₃ se dissocia formando íons amônio (NH₄⁺) e hidroxila (OH⁻) com os quais estabelece um equilíbrio.



As soluções aquosas de amônia são altamente alcalinas. Quando amônia líquida é derramada, ela evapora rapidamente, extraindo calor ambiente e assim causando queimaduras se espirrado na pele. O NH_3 queima formando óxido de nitrogênio (NO_x) e água.

Não apresenta perigo de inflamabilidade e explosão sob condições normais de operação.

Toxicidade

O gás amônia é extremamente corrosivo e irritante à pele, aos olhos, ao nariz e ao trato respiratório. Exposição por inalação causa irritação do nariz, garganta e membranas mucosas a uma concentração de 130 a 200 ppm, a qual provoca também lacrimação, exposições a 3000 ppm é intolerável.

Exposição à altas concentrações (acima de 2500 ppm) ameaçam a vida, tendo como consequências graves danos ao trato respiratório, resultando em bronquites, pneumonias químicas, e edema pulmonar, o que pode ser fatal.

Contacto dos olhos com vapor de amônia é extremamente irritante, e exposição dos olhos ao líquido ou mistura (vapor-líquido) pode resultar em lesões permanentes, chegando a cegueira.

A pele em contacto com o vapor, mistura e líquido, pode resultar em uma irritação ou queimadura, quando em contacto com o líquido causa queimadura criogênica.

Se ingerida no estado líquido queima os tecidos gastrointestinais, provocando dor abdominal intensa, náusea, vômito e colapso, podendo ser fatal.

A amônia não apresenta efeitos carcinogênicos ou mutagênicos.

Tabela III.2: Dados de toxicidade

PEL (OSHA)	35 ppm	ERPG-1	25 ppm
TLV - TWA (ACGIH)	25 ppm	ERPG-2	200 ppm
TLV - STEL (ACGIH)	35 ppm	ERPG-3	1000 ppm

Tabela III.3: Efeitos fisiológicos da amônia (AICHE, 1986)

Concentração do vapor (ppm)	Efeitos gerais	Período de exposição
25 (MAC)	odor detectável pela maioria das pessoas	máxima para uma jornada de trabalho de 8 horas
100	nenhum efeito adverso para metade dos trabalhadores	não é permitido exposição deliberada por longos períodos
400	imediate irritação do nariz e garganta	nenhum efeito após 0,5 a 1 hora
700	imediate irritação dos olhos	nenhum efeito após 0,5 a 1 hora
1700	tosse, irritação grave dos olhos, nariz e garganta	pode ser fatal depois de 0,5 hora
2400	tosse convulsiva	fatal depois de 30 min de exposição
5000	espasmo respiratório	fatal em minutos
10000	asfixia rápida	

ANEXO IV

Propriedades do Ácido Nítrico

Propriedades Físicas

O ácido nítrico (HNO_3) é extremamente difícil de ser produzido como um líquido puro devido à sua tendência de se decompor liberando óxidos de nitrogênio (KIRK-OTHMER, 1978). Quando produzido por destilação à vácuo de uma mistura de nitrato de sódio e ácido sulfúrico concentrado com condensação do líquido somente acima do seu ponto de solidificação ($-41,59^\circ\text{C}$), um líquido incolor é coletado. Os cristais do ácido puro são muito estáveis, mas o líquido se decompõe à qualquer temperatura acima do ponto de fusão, tornando-se amarelo em poucas horas à temperatura ambiente.

O HNO_3 é completamente miscível com a água e geralmente é conhecido e utilizado como soluções aquosas e algumas vezes com a adição de óxidos de nitrogênio dissolvidos em altas concentrações. Dois hidratos podem ser cristalizados das soluções ácidas, por exemplo, um monohidrato ($\text{HNO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), correspondendo a 77,77% em peso de ácido (ponto de fusão $-37,62^\circ\text{C}$) e um trihidrato ($\text{HNO}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$), com 53,83% em peso de ácido (ponto de fusão $-18,47^\circ\text{C}$).

A densidade do ácido nítrico em qualquer temperatura aumenta com a concentração do ácido.

Ácido nítrico fumegante é ácido nítrico concentrado que contém dióxido de nitrogênio dissolvido.

Tabela IV.1: Propriedades físicas de soluções de HNO_3

% em peso de HNO_3	Densidade à 20°C	Ponto de solidificação	Ponto de ebulição	Calor específico à 20°C
40	1,2463 g/cm^3	-30°C	112°C	3,01J/g.K

Propriedades Químicas

O HNO_3 é um ácido forte, reage facilmente com álcalies, óxidos, e materiais básicos formando sais. A reação com amônia, formando nitrato de amônio para uso como fertilizante, é sem dúvida o maior mercado industrial para o ácido nítrico.

O ácido nítrico é um oxidante forte, materiais orgânicos, como a terebintina, carvão vegetal, e serragem carbonizada, são violentamente oxidadas. O álcool pode reagir explosivamente quando o ácido está concentrado. O álcool furfúrico, a anilina, e outras substâncias químicas são usadas com o HNO_3 na fabricação de combustíveis para foguete. Muitos metais, exceto a platina e o ouro, são atacados pelo ácido nítrico, sendo que alguns formam óxidos (como o: arsênico, antimônio e estanho), mas outros são convertidos em nitratos. Os óxidos, sulfetos, e muitos outros elementos, de baixo estado de oxidação podem ser oxidados rapidamente pelo ácido concentrado à estados mais altos de oxidação, exceções, são aços de alumínio e cromo.

A atividade do HNO_3 como agente oxidante aparentemente está associado à presença de óxido de nitrogênio livre. Ácido nítrico puro não ataca o cobre, mas quando óxidos de nitrogênio são introduzidos, a reação no início é lenta e então prossegue rápida e violentamente. Os produtos de redução do ácido nítrico variam muito com a concentração e a energia do redutor com o qual reage. Uma mistura de óxidos geralmente são produzidos, sendo que, ácido nítrico diluído tende à formar predominantemente óxido de nitrogênio, enquanto o concentrado produz uma mistura que é rica em dióxido de nitrogênio. A reação entre ácido muito diluído e um redutor forte (como zinco metálico) produz uma mistura de amônia e hidroxilamina.

Toxicidade

Os vapores de ácido nítrico e os fumos de óxidos nitrosos ou óxidos de nitrogênio (óxido nítrico e dióxido de nitrogênio) são altamente tóxicos e capazes de produzirem ferimentos graves ou morte se manuseados inadequadamente. A extensão do ferimento, da lesão e os sintomas da intoxicação, assim como a natureza do tratamento necessário depende da concentração da substância tóxica, do tempo de exposição, e da sensibilidade do indivíduo. A forma líquida do ácido é muito corrosiva e pode destruir a pele, a mucosa

respiratória, e o tecido gastrointestinal. A extensão das lesões é proporcional ao tempo de contacto e a concentração da solução. Os sintomas que podem surgir são dor aguda, ardência, e manchas amarelas. Contactos continuados podem resultar em queimaduras graves, seguida por ulceração crônica com cicatriz permanente.

Sintomas e lesões pulmonar graves podem ter início num intervalo de tempo 5 a 48 horas após inalação de cerca de 25 ppm por um período de 8 horas; inalação de 100 a 150 ppm por 0,5 a 1 hora pode causar edema pulmonar; e inalação de 200 a 700 ppm pode ser fatal provocando edema pulmonar irreversível num período de 5 a 8 horas (SAX, 1985).

ANEXO V

Análise histórica de acidentes

São descritos neste anexo eventos ocorridos em instalações do ciclo combustível nuclear (usinas de produção de UF₆ e de enriquecimento isotópico), e também acidentes na indústria química e de processo.

1 – Acidentes envolvendo hexafluoreto de urânio, dióxido de urânio, fluoreto de uranila e ácido fluorídrico

Na tabela V.1 são apresentados alguns acidentes envolvendo hexafluoreto de urânio (UF₆), dióxido de urânio (UO₂), fluoreto de uranila (UO₂F₂) e ácido fluorídrico (HF), ocorridos em instalações nucleares, no período de 1944 a 1994 (BODEAU, 1981; USNRC, 1995; USNRC, 1987; USNRC, 1989; INTERNATIONAL CONFERENCE ON URANIUM HEXAFLUORIDE HANDLING, 1991, INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, 1978; EPA, 2000a; EPA, 2000b)

Tabela V.1: Alguns acidentes ocorridos no mundo, envolvendo hexafluoreto de urânio (UF₆), dióxido de urânio (UO₂), fluoreto de uranila (UO₂F₂) e ácido fluorídrico (HF).

Ano	Local	Resumo do acidente	Mortos/Feridos
1944	Filadélfia EUA	Ruptura e explosão de um tanque com vazamento de 200kg de UF ₆ juntamente com vapor d'água.	2/16
1960	Penilvânia EUA	Vazamento em um trocador de calor com liberação de UO ₂ F ₂ para um rio, com concentração 60 acima do limite máximo permissível na descarga.	Não Disponível
1960	Tennessee EUA	Ruptura de um cilindro de 10 ton de em uma planta de enriquecimento de urânio	Não Disponível

Tabela V.1: Alguns acidentes ocorridos no mundo, envolvendo hexafluoreto de urânio (UF_6), dióxido de urânio (UO_2), fluoreto de uranila (UO_2F_2) e ácido fluorídrico (HF).
(continuação)

Ano	Local	Resumo do acidente	Mortos/Feridos
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.	0/1
1967	Oklahoma EUA	Vazamento de 45 kg de UF_6 em uma planta de conversão, devido a um superaquecimento de uma junta de conexão do cilindro. Tempo do vazamento: de 15 a 20 minutos.	0/0
1968	Oklahoma EUA	Vazamento de 45 kg de UF_6 enriquecido, através de uma válvula deixada aberta acidentalmente durante o aquecimento do cilindro.	0/0
1968	Illinois EUA	Falha da válvula na área de destilação, com vazamento de 43 kg de UF_6 em uma 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	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

Tabela V.1: Alguns acidentes ocorridos no mundo, envolvendo hexafluoreto de urânio (UF_6), dióxido de urânio (UO_2), fluoreto de uranila (UO_2F_2) e ácido fluorídrico (HF).
(continuação)

Ano	Local	Resumo do acidente	Mortos/Feridos
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	EUA	Explosão e incêndio durante o processo de conversão de nitrato de uranila líquido em óxido de urânio sólido.	0/2
1975	Pensilvânia EUA	Falha no lavador de gases e no sistema de ventilação levou ao vazamento de urânio enriquecido.	0/0
1977	Pierrelatte França	Manuseio inadequado de um cilindro aquecido a $95^\circ C$ 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

Tabela V.1: Alguns acidentes ocorridos no mundo, envolvendo hexafluoreto de urânio (UF_6), dióxido de urânio (UO_2), fluoreto de uranila (UO_2F_2) e ácido fluorídrico (HF).
(continuação)

Ano	Local	Resumo do acidente	Mortos/Feridos
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 a reação de UF_6 com metal, formando compostos sólidos de urânio.	0/0
1981	Tricastin França	Explosão na área de purificação do UF_6 , causando a destruição de uma tubulação no local.	0/0
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
1983	Carolina do Norte EUA	Ruptura de uma tubulação flexível levou à liberação de UO_2 para a 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	Pierrelatte 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	Aquecimento de um cilindro com superenchimento provocando o vazamento de 14.000 kg de UF_6 em menos de 1 minuto.	1/Muitos

Tabela V.1: Alguns acidentes ocorridos no mundo, envolvendo hexafluoreto de urânio (UF_6), dióxido de urânio (UO_2), fluoreto de uranila (UO_2F_2) e ácido fluorídrico (HF).
(continuação)

Ano	Local	Resumo do acidente	Mortos/Feridos
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
1987	Pierrelatte França	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
1990	Portsmouth EUA	Vazamento de 13 kg de UF_6 , pela abertura nas paredes do cilindro causada pelo choque entre os mesmos.	0/0
1992	Oklahoma EUA	Vazamento de pequena quantidade de UF_6 empobrecido no prédio de produção de UF_4 .	Não Disponível

Tabela V.1: Alguns acidentes ocorridos no mundo, envolvendo hexafluoreto de urânio (UF_6), dióxido de urânio (UO_2), fluoreto de uranila (UO_2F_2) e ácido fluorídrico (HF).
(continuação)

Ano	Local	Resumo do acidente	Mortos/Feridos
1994	Paducah EUA	Vazamento de UF_6 (quantidade desconhecida) provocado por um erro do operador ao remover o cilindro quando o mesmo ainda estava conectado a tubulação para enchimento. Resultou na paralisação da planta.	0/Muitos
1994	Paducah EUA	Vazamento de UF_6 para o interior da caixa de Plexiglass que enclausura a região em que o cilindro é conectado a tubulação para enchimento, provocado por erro operacional.	0/1

2 – Acidentes envolvendo amônia

Na tabela V.2 são apresentados alguns acidentes significativos ocorridos com amônia no mundo, no período de 1962 a 1996 (CARSON E MUMFORD, 1979; LEWIS, 1980; PUBLISHING COMPANY, 1982; INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, 1977; LEES, 1996).

Na análise dos eventos apresentados pode-se observar que, devido às características de toxicidade e inflamabilidade da amônia, alguns acidentes resultaram em conseqüências bastante graves, implicando em mortes e ferimentos.

Tabela V.2: Alguns acidentes ocorridos com amônia no mundo, no período de 1962 a 1996.

Ano	Local	Resumo do acidente	Mortos/Feridos
1962	Kentucky EUA	Tanque de óxido de etileno contaminado com amônia provocou explosão.	1/9

Tabela V.2: Alguns acidentes ocorridos com amônia no mundo, no período de 1962 a 1996.
(continuação)

Ano	Local	Resumo do acidente	Mortos/Feridos
1968	Cincinnati EUA	Explosão de tanques de amônia em uma fábrica.	Não Disponível
1968	Glasgow Escócia	Explosão em pátio de estocagem refrigerado, causando liberação de amônia e evacuação do local.	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	Nebraska EUA	Liberação de 145 ton de amônia de um tanque de estocagem, por ter sido abastecido além de seu nível máximo.	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 devido ao rompimento de uma linha por aumento da pressão interna quanto a válvula de bloqueio não abriu.	0/2
1974	Arklow Irlanda	Ruptura de tanque pressurizado a 30,4 bar.	Não Disponível

Tabela V.2: 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 aguida de explosão por ignição pelo aquecedor de água a gás. Danos estruturais de grandes proporções.	Não Disponível
1976	Zuid-Limburg Holanda	Explosão e incêndio na unidade de amônia de uma instalação.	0/20 (trabalhadores)
1976	Cartagena Colômbia	Explosão em fábrica de fertilizante que utilizava amônia anidra.	30/32
1976	Houston Texas	Liberção de 24.800 litros de amônia anidra, devido ao rompimento de um tanque pela colisão do veículo.	6/108
1977	Landskrona Suécia	Explosão na mangueira de um navio, durante a descarga de amônia para um tanque em terra.	2/2
1977	Cuernavaca México	Vazamento de amônia de uma tubulação com contaminação do sistema de esgoto. Evacuação de moradores locais.	2/102
1977	Thorganby Inglaterra	Liberção de 3 ton de amônia líquida após 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. Evacuaçã 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
1980	Cidade do México México	Vazamento de amônia em um terminal de carregamento.	9/28
1989	Jonova Lituânia	Explosão interna, incêndio e vazamento de amônia.	7/Não Disponível

3 – Acidentes investigados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América – EPA

Na tabela V.3 é apresentada uma compilação dos acidentes referentes às investigações realizadas pela Equipe de Investigação de Acidentes Críticos, da EPA (EPA, 2000b).

Tabela V.3: Acidentes investigados pela EPA, no período de 1994 a 1998.

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 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 evacuação de 2.000 pessoas próximas ao local (durante 30 dias). A água em um pântano adjacente foi altamente contaminada.	0/0
1995	New Jersey EUA	Misturados 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	Pensylvania EUA	Fogo e explosão em tanques de armazenamento que continham hidrocarbonetos inflamáveis. Trabalhadores da instalação e pessoas residentes próximos ao local do acidente foram retirados do local.	5/1
1997	Califórnia EUA	Envolvimento de hidrocarboneto em fogo e explosão. Moradores próximo ao local do acidente foram abrigados em suas próprias residências.	1/44

Tabela V.3: Acidentes investigados pela EPA, no período de 1994 a 1998. (continuação)

Ano	Local	Resumo do acidente	Mortos/Feridos
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 retiradas do local.	1/2
1997	New York EUA	Falha em tanque de armazenamento provocou o derramamento de grande quantidade de ácido clorídrico. A fração vaporizada alcançou distâncias fora do limite das 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	Incêndio e explosão 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. Foram registrados danos a janelas de residências próximas.	0/20 a 30
1997	Indiana EUA	Incêndio e explosão envolvendo óxido de etileno. Cerca de 2.500 pessoas foram evacuadas num raio de aproximadamente 2 km ao redor da instalação.	1/16
1997	Ohio	Explosão de caldeira de fenol/formaldeído. Quinze residências foram evacuadas.	1/13
1998	Maryland EUA	Ocorrência de explosão e fogo quando os trabalhadores estavam esvaziando um reator que continha cloreto de alumínio.	0/8

Tabela V.3: Acidentes investigados pela EPA, no período de 1994 a 1998. (continuação)

Ano	Local	Resumo do acidente	Mortos/Feridos
1998	New Jersey EUA	Explosão e incêndio 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 retirada do local.	0/9

ANEXO VI

O modelo de dispersão atmosférica utilizado é o gaussiano, que determina a concentração de um efluente, ao nível do solo, liberado continuamente por uma fonte pontual (IAEA, 1980; LAMARSH, 1975):

$$c = \frac{1}{\pi \sigma_y \sigma_z \mu} \cdot \frac{dm}{dt} \cdot \exp. \left[\frac{-1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{H^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (\text{VI-1})$$

onde:

c = concentração média do efluente no ponto (x, y,z) (kg/m³)

$\frac{dm}{dt}$ = intensidade da fonte, isto é, taxa de liberação (vaporização) do efluente (kg/s)

u = velocidade do vento (m/s) (assumida segundo eixo Ox)

σ_y = flutuação horizontal da direção do vento (m)

σ_z = flutuação vertical da direção do vento (m)

H = altura efetiva da liberação (m)

x = distância do ponto de liberação na direção do vento (m)

y = distância ortogonal à linha imaginária do eixo Ox (m)

Os valores de σ_y e σ_z em função da distância ao ponto de liberação, para as diversas classes de estabilidade atmosférica, podem ser obtidas pelas expressões desenvolvidas por (EIMUTS e KONICEK, 1972). As expressões de σ_y e σ_z são apresentadas no Anexo VII.

A altura efetiva é dada por: $H = h + \Delta h$ (VI-2)

onde:

h = altura da chaminé (m)

Δh = “plume - rise” (elevação da pluma)

Para as condições assumidas neste trabalho de liberação ao nível do solo ($H=0$), classes de estabilidade atmosférica Pasquill D (neutra: $u = 3$ m/s) e F (moderadamente estável: $u = 1$ m/s) e incluindo o fator de correção devido ao efeito “building - wake”, a equação de dispersão fica (IAEA, 1980):

$$\frac{\chi}{Q} = \frac{1}{u(\pi\sigma_y \cdot \sigma_z + C.A)} \quad (\text{VI-3})$$

onde:

$\frac{\chi}{Q}$ = fator de dispersão atmosférica (s/m^3)

C.A = fator de correção devido ao efeito “building - wake”

A = área do edifício na direção normal ao vento (m^2)

C = fração da área na qual a pluma é dispersa pelo efeito turbulento

Considerando-se o mecanismo de deposição seca, devido a ação gravitacional durante a dispersão da pluma, a incorporação de urânio é corrigida pelo f_d dado por (IAEA, 1980):

$$f_d = \exp \left[-\sqrt{2\pi} \cdot \frac{v_d}{u} \int_0^x \frac{dx}{\sigma_z \cdot \exp\left(\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right)} \right] \quad (\text{II-4})$$

onde:

v_d = velocidade de deposição (m/s)

Para as duas condições foi considerada uma velocidade típica de deposição igual a 0,01 m/s (IAEA, 1980)

ANEXO VII

Flutuações horizontal (σ_y) e vertical (σ_z)

1 - Determinação do σ_y

A flutuação horizontal σ_y (EIMUTS e KONICEK, 1972) é dada por:

$$\sigma_y = K \cdot x^\alpha$$

onde:

K = coeficiente que depende da classe de estabilidade Pasquill, conforme tabela VII.1

x = distância em relação ao ponto de liberação (m)

$$\alpha = 0,9031$$

Tabela VII.1: Valores de K em função da classe de estabilidade

Classe de estabilidade	K
A	0,3658
B	0,2751
C	0,2089
D	0,1471
E	0,1046
F	0,0722

2 - Determinação de σ_z

A flutuação vertical σ_z (EIMUTS e KONICEK, 1972) é dada por:

$$\sigma_z = L \cdot x^\beta + M$$

onde:

L , β , M : coeficientes que dependem da classe de estabilidade atmosférica e da distância x em relação ao ponto de liberação, conforme a tabela VII.2

Para cada intervalo de distância, são definidas as seguintes expressões:

1) Se $x > 1000$ m: $\sigma_z = L_1 \cdot x^{\beta_1} + M_1$

2) Se $100 < x < 1000$ m: $\sigma_z = L_2 \cdot x^{\beta_2} + M_2$

3) Se $x < 100$ m: $\sigma_z = L_3 \cdot x^{\beta_3}$

Tabela VII.2: Valores das constantes para se determinar σ_z

Intervalo	Classe de estabilidade	Coeficientes		
		L_1	β_1	M_1
$X > 1000$ m	A	0,00024	2,094	-9,6
	B	0,055	1,098	2,0
	C	0,113	0,911	0,0
	D	1,26	0,516	-13
	E	6,73	0,305	-34
	F	18	0,180	-49
		L_2	β_2	M_2
	$100 < x < 1000$ m	A	0,0015	1,941
B		0,028	1,149	3,3
C		0,113	0,911	0,0
D		0,222	0,725	-1,7
E		0,211	0,678	-1,3
F		0,086	0,74	-0,35

		L_3	β_3
x < 100 m	A	0,192	0,936
	B	0,156	0,922
	C	0,116	0,905
	D	0,079	0,881
	E	0,063	0,871
	F	0,053	0,814

ANEXO VIIIPrograma Computacional CONV_ACI**Dados de entrada**

- C Classe de estabilidade
- Q Quantidade liberada (kg)
- v Velocidade de deposição (m/s)
- t Tempo de liberação (min)
- H Altura da liberação (m)
- d Distância em relação a fonte (m)

Dados de saída

- C_{HF} Concentração de HF (mg/m^3)
- I_u Incorporação de urânio (mg)
- f_d fator de deposição seca

ANEXO IX

Estabilidade Atmosférica

Uma das características mais importantes da atmosfera é sua estabilidade, isto é, a influência sobre a capacidade da atmosfera de dispersar os contaminantes que são emitidos, procedentes de fontes naturais ou antropogênicas. Define-se uma atmosfera estável como aquela que não apresenta altas variações de mistura ou movimentos verticais intensos. Para que haja mistura a uma escala significativa, necessita-se das seguintes condições: o gradiente de temperatura e a turbulência mecânica devido à ação do vento (CROWL e LOUVAR, 1990).

Entende-se como condição favorável, a soma das classes A, B e C de Pasquill. A condição neutra equivale a classe D de Pasquill e a condição desfavorável a classe E. As classes de estabilidade de Pasquill são obtidas a partir de grandezas meteorológicas médias horárias (velocidade do vento e radiação solar ou cobertura de nuvens) medidas a poucos metros da superfície. Elas fornecem apenas uma idéia aproximada da estabilidade da sub-camada superficial da camada-limite atmosférica. A grandeza que mede corretamente a estabilidade na sub-camada superficial é a variável de estabilidade de Obukhov, a qual pressupõe medições dos fluxos turbulentos de quantidade de movimento e calor sensível virtual, usualmente feitas com anemômetros sônicos. Um outro fator importante para a qualidade do ar, que não pode ser medido na superfície, é a espessura da camada-limite atmosférica (também chamada de camada de mistura), para a qual são necessários perfis de temperatura do ar através da camada-limite atmosférica (até no mínimo 2000 m acima da superfície). As condições reais de qualidade do ar na RMC dependerão tanto da estabilidade atmosférica avaliada na superfície quanto da espessura desta camada.

Tabela IX.1 : Categorias de estabilidade atmosférica proposta por Pasquill

Velocidade do vento (m/s)	Dia Intensidade da radiação solar			Noite Cobertura da nuvem	
	forte	média	fraca	nubelosa	limpa & calma
<2	A	A - B	B		
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Sendo: A, B: instável

C, D: neutra

E, F: estável