

34:072742

BRO3 43207



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

**ANÁLISE DE PERIGOS EM INSTALAÇÕES DE
ENRIQUECIMENTO ISOTÓPICO DE URÂNIO**

CHRISTIANE MAZUR LAURICELLA

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Reatores.

Orientador:

Dr. José Messias de Oliveira Neto

São Paulo

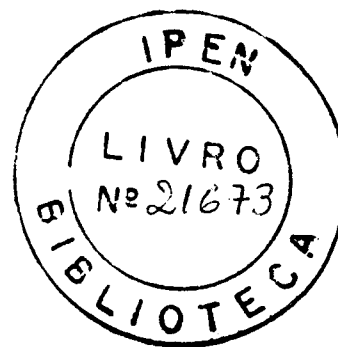
1998

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ANÁLISE DE PERIGOS EM INSTALAÇÕES DE ENRIQUECIMENTO
ISOTÓPICO DE URÂNIO

CHRISTIANE MAZUR LAURICELLA



Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para a obtenção do Grau de Mestre
em Tecnologia Nuclear

Orientador: Dr. José Messias de Oliveira Neto

São Paulo

1998

ANÁLISE DE PERIGOS EM INSTALAÇÕES DE ENRIQUECIMENTO
ISOTÓPICO DE URÂNIO

CHRISTIANE MAZUR LAURICELLA

RESUMO

Neste trabalho descreve-se um método para a análise preliminar de perigos em instalações do ciclo do combustível nuclear. O método proposto identifica perigos químicos e radiológicos bem como avalia as consequências de eventos indesejáveis. Uma planta de enriquecimento isotópico de urânio por ultracentrifugação foi escolhida para ilustrar a aplicação do método.

HAZARD ANALYSIS IN ISOTOPIC URANIUM ENRICHMENT FACILITIES

CHRISTIANE MAZUR LAURICELLA

ABSTRACT

This work describes a method for preliminary hazard assessment of nuclear fuel cycle facilities. The method identifies chemical and radiological hazards and evaluates the consequences of undesirable events. A gas centrifuge uranium enrichment plant was chosen to illustrate the application of the method proposed.

Dedico este trabalho:

A Deus

Ao meu pai, Luiz Mazur

À minha mãe, Wilma Bravo Mazur

Ao meu marido, Arduino Francesco Lauricella

À minha filha, Annia Lalesca Mazur Lauricella,

Aos quais serei eternamente grata.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN/CNEN-SP).

Ao Recursos Humanos em Áreas Estratégicas do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (RHAE-CNPq).

Ao Prof. Dr. José Messias de Oliveira Neto.

A Leslie de Molnary.

A Néelson Luiz Dias Ferreira.

A todos os que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

ABREVIATURAS

ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists

AIHA: American Industrial Hygiene Association

AMFE: Análise de Modos de Falha e Efeitos

C: Ceiling

CF: Conexão Flexível

CNEN: Comissão Nacional de Energia Nuclear

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPDF: Centrifuge Plant Demonstration Facility

DAIA: Departamento de Avaliação de Impacto Ambiental

DOE: Department of Energy

DS1: Dessublimador Primário

DS2: Dessublimador Secundário

EEGL: Emergency Exposure Guidance Level

EIA: Estudo de Impacto Ambiental

EPA: Environmental Protection Agency

ERPG: Emergency Response Planning Guideline

IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Renováveis

IDLH: Immediately Dangerous to Life or Health

ISO: International Organization for Standardization

LD₅₀: Lethal Concentration to 50% of Exposure Subjects

LI: Licença de Instalação

LO: Licença de Operação

LOC: Level of Concern

LP: Licença Prévia

NAS: National Academy of Science

NIOSH: National Institute for Occupational Safety and Health

OSHA: Occupational Safety and Health Administration

PEE: Plano de Emergência Externo

PEL: Permissible Exposure Limit

PGA: Plano de Gerenciamento Ambiental

PNP: Plano de Notificação Pública

PSE: Plano para Situações de Emergência

RAL: Relatório de Análise do Local

RAS: Relatório de Análise de Segurança

RFAS: Relatório Final de Análise de Segurança

RPAS: Relatório Preliminar de Análise de Segurança
RIMA: Relatório de Impacto Ambiental
SEMA: Secretaria Especial do Meio Ambiente
SGA: Sistema de Gerenciamento Ambiental
SIPRON: Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro
SISNAMA: Sistema Nacional do Meio Ambiente
SMA: Secretaria do Meio Ambiente
STEL: Short-Time Exposure Limit
TB: Tubulação
TLVs: Threshold Limit Values
TWA: Time Weighted Average
USNRC: U. S. Nuclear Regulatory Commission
VEP: Válvula Eletro-Pneumática
WSRC: Westinghouse Savannah River Company

ÍNDICE

	pág.
<u>Capítulo 1:</u> Introdução	1
<u>Capítulo 2:</u> Aspectos Normativos e de Licenciamento de Instalações do Ciclo do Combustível Nuclear	3
2.1 - Introdução	3
2.2 - O licenciamento nuclear	4
2.2.1 - Relatório do local	5
2.2.2 - Relatório de análise de segurança	5
2.2.3 - Planejamento de emergência local	6
2.2.4 - Considerações sobre instalações do ciclo do combustível nuclear	8
2.3 - O licenciamento ambiental	9
2.3.1 - Legislação	9
2.3.2 - Estudo de impacto ambiental	12
2.4 - Conclusões	13
<u>Capítulo 3:</u> Avaliação de Perigos	14
3.1 - Introdução	14
3.2 - Considerações gerais sobre riscos	16
3.2.1 - Identificação de perigos	16
3.2.2 - Efeitos da exposição a substâncias tóxicas	20
3.2.3 - Limites de tolerância	21
3.2.4 - Caracterização de perigos	28
3.2.4.1 - Impactos sobre a saúde humana	28
3.2.4.2 - Impactos sobre o meio ambiente	29
3.2.4.3 - Impactos programáticos	29

3.2.5 - Gerenciamento de perigos	30
3.2.6 - ISO 14000	31
3.3 - Métodos de avaliação de perigos	35
3.3.1 - Análise de Modos de Falha e Efeitos (AMFE)	35
3.3.2 - Procedimentos para avaliação de perigos	37
<u>Capítulo 4: Análise de Perigos da Planta de Demonstração CPD</u>	42
4.1 - Introdução	42
4.2 - Descrição da instalação	42
4.2.1 - Edificações	43
4.2.2 - Manipulação e estocagem de UF ₆	45
4.2.3 - Processo	45
4.2.4 - Principais sistemas da instalação	45
4.2.4.1 - Sistema de alimentação	45
4.2.4.2 - Cascata de centrífugas	50
4.2.4.3 - Sistema de retirada de produto	50
4.2.4.3.1 - Etapas para o enchimento do cilindro 30B com UF ₆ líquido	57
4.2.4.3.2 - Comentários a respeito do sistema de retirada de produto	57
4.2.4.4 - Sistema de retirada de rejeito	58
4.2.4.5 - Sistema de ventilação e exaustão	59
4.2.4.6 - Efluentes gasosos	60
4.2.4.7 - Resíduos não radiológicos	60
4.3 - Análise histórica de acidentes em plantas similares	60
4.3.1 - Usina de separação isotópica de Tricastin	61
4.3.2 - Planta de difusão gasosa de Portsmouth	61
4.3.3 - Planta de difusão gasosa de Paducah	63
4.3.4 - Planta de centrifugação E22 de Capenhust	64

4.3.5 - Planta de difusão gasosa de Oak Ridge	67
4.3.6 - Planta de ultracentrifugação de Nederland	67
4.3.7 - Instalações de enriquecimento da Urenco	68
4.4 - Aplicação do método de avaliação de perigos	69
4.4.1 - Divisão da planta em áreas, identificação dos componentes, modos de falha e inventário de materiais	69
4.4.2 - Identificação dos eventos indesejáveis nas áreas da CPDF	72
4.4.2.1 - Introdução	72
4.4.2.2 - Eventos indesejáveis	72
4.4.2.3 - Conclusão	76
4.4.3 - AMFE da área de retirada de produto	77
4.4.3.1 - Introdução	77
4.4.3.2 - Características dos componentes analisados	79
4.4.3.3 - Tabela da AMFE	80
4.4.3.4 - Resultados da AMFE	90
4.4.4 - Classificação dos casos de vazamentos	91
4.4.5 - Determinação dos termofontes	92
4.4.6 - Avaliação de consequências	92
4.4.6.1 - Propriedades do UF ₆	93
4.4.6.1.1 - Propriedades físicas do UF ₆	93
4.4.6.1.2 - Propriedades químicas do UF ₆	95
4.4.6.1.3 - Toxicidade do UF ₆ e seus produtos de hidrólise	95
4.4.6.1.4 - Toxicidade do ácido fluorídrico	96
4.4.6.2 - Critério de classificação de eventos indesejáveis	97
4.4.6.3 - Dispersão atmosférica de substâncias	100
4.4.6.4 - Análise de consequências	106
4.4.6.5 - Programa CONV_ACI	108
4.4.7 - Resultados	108

4.4.7.1 - Avaliação quantitativa do termofonte caso C	108
4.4.7.2 - Consequências das liberações acidentais	110
4.4.7.2.1 - Análise do caso C1	111
4.4.7.2.2 - Análise do caso C2	112
4.4.7.2.3 - Análise do caso C3 (atuação do sistema de ventilação e exaustão da área atingida)	120
4.4.7.2.4 - Análise do caso C4 (considerando-se o "plume-rise")	121
4.4.7.2.5 - Análise do caso C5 (medidas atenuadoras de impacto)	122
4.4.7.2.6 - Resumo dos casos analisados	127
<u>Capítulo 5:</u> Conclusões e recomendações	131
5.1 - Conclusões	131
5.2 - Recomendações	132
<u>Capítulo 6:</u> Referências bibliográficas	134

LISTA DE FIGURAS

	pág	
Fig. 3.1:	Principais etapas da avaliação de riscos	15
Fig. 3.2:	Perigos associados a uma instalação	18
Fig. 3.3:	Tipos de vazamentos de substâncias perigosas	19
Fig. 3.4:	Principais vias de exposição a substâncias tóxicas	25
Fig. 3.5:	Caminhos das substâncias tóxicas no organismo	26
Fig. 3.6:	Toxicidade efetiva de uma substância no organismo	27
Fig. 3.7:	Etapas para a avaliação de perigos	40
Fig. 3.8:	Etapas para a avaliação de perigos no caso de liberação de substâncias	41
Fig. 4.1:	Arranjo físico do primeiro andar da CPDF	44
Fig. 4.2:	Fluxo de massa nas principais áreas da CPDF	47
Fig. 4.3:	Fluxograma do sistema de alimentação da CPDF	48
Fig. 4.4:	Etapas na operação do sistema de alimentação da CPDF	49
Fig. 4.5:	Esquema dos estágios da cascata de centrífugas	51
Fig. 4.6:	Esquema do processo de enriquecimento isotópico por ultracentrifugação	54
Fig. 4.7:	Fluxograma da área de retirada de produto da CPDF	55
Fig. 4.8:	Esquema parcial da área de retirada de produto	78
Fig. 4.9 :	Distribuição dos eventos indesejáveis (planta e ambiente)	90
Fig. 4.10:	Distribuição dos eventos indesejáveis mais relevantes	91
Fig. 4.11:	Distribuição de todos os eventos	91
Fig. 4.12:	Diagrama de fases do UF ₆	94
Fig.4.13:	Flutuação horizontal em função da distância	102
Fig.4.14:	Flutuação vertical em função da distância	103
Fig.4.15:	X/Q em função da distância para as classes D e F, considerando-se liberação ao nível do solo	104

Fig.4.16:	Fator de deposição seca em função da distância para as classes de estabilidade D e F	105
Fig.4.17:	Concentração de HF no ar - Caso C1	114
Fig.4.18:	Incorporação de urânio via inalação - Caso C1	115
Fig.4.19:	Dose equivalente efetiva e por órgão - Caso C1	116
Fig.4.20:	Concentração de HF no ar - Caso C2	117
Fig.4.21:	Incorporação de urânio via inalação - Caso C2	118
Fig.4.22:	Dose equivalente efetiva e por órgão - Caso C3	119
Fig.4.23:	Concentração de HF, incorporação de urânio e dose equivalente efetiva - Caso C3	124
Fig.4.24:	Concentração de HF, incorporação de urânio e dose equivalente efetiva - Caso C4	125
Fig.4.25:	Concentração de HF, incorporação de urânio e dose equivalente efetiva - Caso C5	126

LISTA DE TABELAS

	pág	
Tab.3.1:	Impactos sobre a saúde: consequências radiológicas	31
Tab.3.2:	Impactos sobre a saúde: consequências toxicológicas	31
Tab.3.3:	Parâmetros recomendados na determinação dos grupos	32
Tab. 3.4:	Impactos sobre o meio ambiente	32
Tab. 3.5:	Impactos devidos a prejuízos financeiros	33
Tab.3.6:	Impactos sobre a operação da planta	33
Tab. 3.7:	Modelo da tabela padrão utilizada na AMFE	37
Tab. 4.1:	Características dos dessublimadores	53
Tab. 4.2:	Siglas mneumômicas utilizadas na codificação de eventos	80
Tab. 4.3:	Características dos itens da área de retirada de produto	82
Tab. 4.4:	AMFE da área de retirada de produto	84
Tab. 4.5:	Estatística dos possíveis eventos indesejáveis na área de retirada de produto	93
Tab. 4.6:	Propriedades físicas do UF ₆	96
Tab.4.7:	Efeitos adversos à saúde devido a inalação de urânio	101
Tab. 4.8:	Efeitos da inalação de HF em animais	101
Tab. 4.9:	Concentração de HF equivalente ao IDLH	102
Tab.4.10:	Critérios para a classificação de um evento	102
Tab.4.11:	Valores que definem grupos para o U solúvel e o HF	102
Tab.4.12:	Resumo dos casos analisados	130

LISTA DE ANEXOS

	pág
Anexo I: Resumo das características dos cilindros 30B e 48Y	139
Anexo II: Flutuações horizontal e vertical da direção do vento	140
Anexo III: Fatores de conversão de dose efetiva para os isótopos do urânio U-234, U-235 e U-238	142
Fatores de conversão de dose por órgão (ossos, rins e pulmão) para os isótopos do urânio U-234, U-235 e U-238	142
Abundância isotópica do urânio	142
Anexo IV: Programa computacional CONV_ACI	143
Anexo V: Fração em massa de vapor resultante de uma liberação de UF ₆ líquido saturado à pressão atmosférica	144

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os perigos que uma instalação nuclear oferece aos operadores, indivíduos do público e meio ambiente é fator decisivo no seu processo de licenciamento.

O projeto de plantas nucleares deve atender a padrões de segurança que venham a garantir que sua operação não trará riscos inaceitáveis aos seres humanos e à natureza local. Para tanto, os órgãos governamentais têm adotado medidas cada vez mais restritivas no que se refere ao licenciamento de novas instalações e à implantação e fiscalização de políticas de controle ambiental.

O processo de licenciamento nuclear no Brasil é regulamentado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), sendo que os requisitos a serem cumpridos pelo proponente encontram-se dispostos em normas e guias de projeto.

O licenciamento ambiental é de responsabilidade do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Renováveis (IBAMA), sendo regulamentado pela lei 6938, de 31 de agosto de 1981 /1/.

Tanto a CNEN como o IBAMA exigem, de maneiras distintas e independentes, estudos de segurança para a obtenção das licenças necessárias à localização, à construção e à operação de uma instalação nuclear.

O objetivo deste trabalho é propor e aplicar um método de avaliação de perigos para unidades do ciclo do combustível nuclear. O método é baseado em estudos desenvolvidos para plantas químicas convencionais, adicionando-se o componente do perigo radiológico. O resultado da composição dos perigos químicos e radiológicos leva ao estabelecimento de requisitos que garantam a operação segura da instalação.

O presente trabalho é estruturado em cinco capítulos.

No Capítulo 2 são analisados os principais aspectos normativos que regulamentam o licenciamento de instalações do ciclo do combustível nuclear, tanto em nível nuclear como ambiental.

No Capítulo 3 são descritos dois métodos de avaliação de perigos. O primeiro baseia-se em técnica utilizada pelo Banco Mundial para identificar e analisar perigos em instalações convencionais. Esta técnica foi adaptada com o objetivo de incluir os perigos resultantes da exposição à radiação. Já a Análise de Modos de Falha e Efeitos (AMFE) foi usada para identificar os eventos indesejáveis no sistema mais crítico da instalação, utilizado como exemplo de aplicação do método.

No Capítulo 4 é apresentada a descrição de uma planta de enriquecimento isotópico de urânio por ultracentrifugação gasosa utilizada como referência para a aplicação do método proposto. A partir da análise dos sistemas que operam com UF_6 (substância de maior de interesse manipulada na planta) foram identificados os eventos indesejáveis mais relevantes, sendo que o mais impactante foi analisado em detalhes.

No Capítulo 5 é apresentada a conclusão do estudo da planta de enriquecimento e no Capítulo 6 são enumeradas as referências bibliográficas utilizadas.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS NORMATIVOS E DE LICENCIAMENTO DE INSTALAÇÕES DO CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR

2.1 - Introdução

No Brasil, o licenciamento de instalações nucleares deve cumprir dois requisitos básicos e independentes: o nuclear (a juízo da CNEN) e o ambiental (a juízo do IBAMA).

Como as plantas de enriquecimento isotópico de urânio operam com material nuclear, a CNEN as classifica como Instalações Nucleares, de acordo com a Norma Experimental CNEN-NE-1.04 /2/. Logo, o processo de licenciamento de usinas de enriquecimento isotópico de urânio segue as normas específicas de fábricas que produzem, processam, reprocessam ou estocam materiais nucleares em quantidades relevantes.

Esses tipos de instalações também requerem licenciamento junto ao IBAMA por tratarem-se de unidades fabris com potencial de contaminação e degradação do meio ambiente. A construção, instalação, ampliação e funcionamento dessas instalações é regulamentada pela lei 6938, que "Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências" /1/.

Um aspecto interessante no que se refere a essas regulamentações é que o processo de licenciamento nuclear envolve a elaboração de documentos, como o Relatório de Análise do Local (RAL), o Relatório de Análise de Segurança (RAS) e o Planejamento de Emergência Local, pelo próprio proponente da instalação. Esses documentos, além de outros, devem ser submetidos a aprovação junto à CNEN.

No caso do licenciamento ambiental, a documentação deve ser preparada por firma contratada pelo requerente, que não tenha tido envolvimento com o projeto da instalação. Os principais documentos são o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), desenvolvidos através de informações geradas pela empresa contratada e de dados fornecidos pelo proponente. O EIA também prevê a elaboração de um plano que atenda a situações emergenciais.

2.2 - O licenciamento nuclear

No Brasil, o processo de licenciamento de instalações do ciclo do combustível nuclear é regulamentado pela CNEN por meio da Norma Experimental CNEN-NE-1.04 /2/. Esse processo tem como finalidade demonstrar que o projeto de uma determinada instalação cumpre os requisitos de segurança exigidos pelo órgão licenciador. Dessa forma, garante-se que a instalação nuclear analisada irá operar seguramente e que, em caso de emergência envolvendo radiação, serão executadas medidas que assegurem a saúde dos trabalhadores e dos indivíduos do público, sem comprometer o meio ambiente, conforme os princípios básicos da radioproteção.

O licenciamento de uma instalação nuclear envolve as seguintes principais etapas:

1. Aprovação do local: ato pelo qual o órgão licenciador avalia se as condições da região escolhida para a implantação da instalação nuclear são adequadas ou não. As informações necessárias a essa etapa devem estar contidas no RAL.
2. Licença de construção: ato pelo qual o órgão licenciador autoriza o início da construção da instalação nuclear. Os documentos que devem acompanhar o requerimento de licença de construção são o Relatório Preliminar de Análise de Segurança (RPAS) e o Plano Preliminar de Proteção Física, de acordo com a norma CNEN-NE-2.01 /3/.
3. Autorização para o uso de material nuclear: ato pelo qual o órgão licenciador permite o uso de material nuclear em uma instalação nuclear.
4. Autorização para a operação inicial: ato pelo qual o órgão licenciador permite o início da fase operacional da instalação, após a avaliação do Relatório Final de Análise de Segurança (RFAS) e do Planejamento de Emergência Local.
5. Autorização para a operação permanente: ato pelo qual o órgão licenciador fornece o aval de operação da instalação em caráter permanente, sendo que o Planejamento de Emergência Local abrange também essa etapa.

Dentre os documentos referentes a essas etapas, serão destacados os relacionados com a aprovação do local (RAL) e com a construção e a operação da usina (RAS e Planejamento de Emergência Local), pois informam sobre a avaliação de perigos e a segurança da instalação.

2.2.1 - Relatório do Local

O conteúdo mínimo do RAL é definido pela Norma CNEN-NE-1.04 /2/. Nesse relatório devem estar incluídos itens como: descrição da instalação, caracterização física do local, distribuição populacional, atividades desenvolvidas na área, uso do solo e programa de monitoração ambiental.

No que se refere aos perigos associados à instalação, é exigida pelo RAL uma análise preliminar do potencial de impacto ao meio ambiente resultante da sua construção e da sua operação normal ou em condições acidentais.

Nessa fase, os acidentes potenciais são identificados e analisados de forma a se obterem resultados mais próximos da realidade (no caso de uma análise de acidentes para o RAS, as hipóteses consideradas são conservativas e, portanto, superestimam o impacto ambiental oriundo da instalação).

2.2.2 - Relatório de Análise de Segurança

O RAS é um documento técnico que visa demonstrar que a instalação foi projetada e construída segundo padrões de segurança que garantam a sua operação adequada sem acarretar riscos inaceitáveis para operadores, população e meio ambiente. Esse relatório pode ter caráter preliminar, quando encaminhado ao órgão licenciador para a obtenção da licença de construção, ou final, quando acompanhar o requerimento para a operação inicial da instalação.

O RPAS, conforme a Norma CNEN-NE-1.04 /2/, deve comprovar as qualificações técnicas do requerente para o exercício das atividades propostas e apresentar o plano de treinamento de pessoal, os planos preliminares de proteção contra incêndio e situações de emergência, a influência de instalações próximas e as características dos sistemas de controle de liberação de efluentes e rejeitos radioativos. Exige-se a avaliação dos perigos em condições normais e em condições acidentais.

Já o RFAS deve incluir, segundo a Norma CNEN-NE-1.04 /2/, informações mais detalhadas sobre o projeto da instalação e os limites de operação, descrevendo os processos desenvolvidos, os itens, equipamentos e sistemas de instrumentação e controle, caracterizando o inventário e a natureza dos materiais radioativos envolvidos. São exigidas a avaliação do local (através dos resultados de programas de monitoração ambiental e meteorológica) e a avaliação do perigo associado à operação da instalação.

A análise de acidentes pertinente ao RAS deve ser abrangente, considerando tanto os eventos internos como os externos, além dos eventos naturais severos e os produzidos pelo homem.

2.2.3 - Planejamento de Emergência Local

As instalações do ciclo do combustível nuclear são órgãos integrantes do Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro (SIPRON), responsáveis pela elaboração do Planejamento de Emergência Local.

A finalidade do SIPRON, instituído pelo decreto 2210 de 22 de abril de 1997 /4/, é assegurar o planejamento e a implementação de medidas que garantam a segurança e a saúde dos trabalhadores de instalações nucleares, assim como a proteção da população e do meio ambiente em situações emergenciais.

No Planejamento de Emergência Local são definidas as medidas a serem praticadas dentro dos limites da propriedade da instalação em caso de emergência nuclear. A instalação deve adotar e integrar essas medidas, além de manter a Força de Segurança para garantir sua própria proteção física e participar das ações emergenciais.

A estrutura global de um planejamento de emergência pode requerer, além do Planejamento de Emergência Local, os seguintes planos: Plano para Situações de Emergência (PSE, elaborado pela CNEN), Plano de Emergência Externo (PEE, elaborado por Governos estaduais e municipais e Ministérios afins) e Plano de Notificação Pública (PNP, elaborado pela Defesa Civil Federal). A necessidade ou não da adoção desses planos é determinada pelos resultados obtidos em uma análise de perigos, de acordo com as consequências de um possível evento indesejável.

O Planejamento de Emergência Local deve contemplar os seguintes aspectos:

Atribuições

A formação de uma estrutura organizacional eficiente é fator determinante para o sucesso do Planejamento de Emergência Local. Os coordenadores têm o poder de decisão em caso de acidentes, sendo responsáveis pela mobilização de recursos internos e externos. Os grupos de emergência prestam assistência aos coordenadores, sendo formados por equipes de radioproteção, Força de Segurança, brigada contra incêndio e outros.

Crítérios

O planejamento de emergência deve apresentar critérios que determinem ou não a necessidade de tomada de ações emergenciais, em função das consequências previstas pela análise de perigos.

Segundo /5/, se a avaliação de perigos demonstrar que em qualquer situação a incorporação de urânio solúvel não ultrapassar o valor de $2 \cdot 10^{-6}$ kg, o Planejamento de Emergência Local não se faz necessário.

Evacuação

Quando as hipóteses acidentais presumidas na análise de perigos mostrarem a possibilidade de vazamentos e liberações para o meio ambiente, o plano deve definir procedimentos para a evacuação da instalação e da comunidade vizinha se necessário. Esses procedimentos devem ser ensaiados periodicamente com as pessoas envolvidas para que estas fiquem familiarizadas com suas tarefas específicas.

Rotinas de ação

Devem ser apresentadas as rotinas que descrevem as ações dos grupos de emergência, incluindo o plano de evacuação.

Recursos

A discriminação dos recursos inclui a participação humana e a disposição de materiais que possam ser utilizados em situações emergenciais, como equipamentos de proteção individual, de monitoramento, de contenção e de combate a incêndio; sistema de alarme; sistema de descontaminação; meios de transporte; serviços médicos; etc.

Conclui-se que a finalidade do planejamento de emergência é fornecer os elementos necessários para se verificar em que situações as medidas de controle de eventos indesejáveis devem ser acionadas e como operacionalizar essa tomada de ações, garantindo a saúde e segurança dos trabalhadores e indivíduos do público e minimizando os danos à propriedade e a contaminação do meio ambiente.

2.2.4 - Considerações sobre instalações de enriquecimento isotópico de urânio

No Brasil não há critérios específicos que orientem a elaboração de uma análise de segurança em instalações de enriquecimento isotópico de urânio. As normas em vigor enfatizam o perigo radiológico do urânio, sem estabelecer critérios para uma avaliação em que o risco tóxico-químico é preponderante, como ocorre no caso do UF₆.

Demonstra-se em estudo apresentado no relatório NUREG 1391 /6/, que a toxicidade química do UF₆ supera a radiológica, sendo insuficiente a aplicação de critérios de segurança de reatores nucleares para plantas de enriquecimento de urânio.

As normas em uso no Brasil ainda não tratam dessa questão. Existe regulamentação específica apenas para a elaboração do relatório de análise de segurança de usinas de produção de hexafluoreto de urânio natural (CNEN-NE-1.11 /7/) e para fábricas de elementos combustíveis (CNEN-NE-1.09 /8/). Essas normas, editadas em datas anteriores à publicação do relatório NUREG 1391 /6/, são orientadas a considerar o critério radiológico como o principal aspecto de segurança a ser analisado em seus documentos.

A área de exclusão, informação integrante do Relatório de Análise de Segurança, por exemplo, é determinada por critério exclusivamente radiológico. Tal definição determina que "a dose total de radiação de corpo inteiro não pode exceder de 0,25 Sv (25 Rem) e a dose total de radiação, por inalação, de I-131 na tireóide não pode exceder 3 Sv (300 Rem) para um indivíduo situado nos limites de propriedade da instalação" /8/.

A "U.S. Nuclear Regulatory Commission" (USNRC), reconhecendo a dificuldade em se avaliar instalações do ciclo do combustível nuclear com critérios desenvolvidos para reatores nucleares, propôs, em 1988, uma revisão na regulamentação usada para a construção e operação de instalações nucleares (10 CFR Part 76 /9/) no tocante às plantas de enriquecimento, de modo que o aspecto da

toxicidade química do UF₆ seja considerado, priorizando os seus efeitos na proteção da saúde e segurança dos indivíduos do público. Esta nova regulamentação já está sendo aplicada no processo de licenciamento da usina Claiborne Enrichment Center, Homer, na Louisiana /10/.

No presente trabalho, os critérios resultantes dessa nova regulamentação são utilizados para avaliar as consequências dos eventos indesejáveis. Esse tópico é discutido em detalhes no Capítulo 4.

2.3 - O licenciamento ambiental

2.3.1 - Legislação

A lei 6803 /1/ de 2 de julho de 1980, no seu artigo 9, determina que “o licenciamento para implantação, operação e ampliação de estabelecimentos industriais, ... , dependerá da observância do disposto nessa lei, bem como do atendimento das normas e padrões ambientais dispostos pela Secretaria Especial do Meio Ambiente (SEMA), pelos organismos estaduais e municipais competentes, notadamente quanto as seguintes características dos processos de produção:

- emissão de gases, vapores, ruídos, vibrações e radiações;
- risco de explosão, incêndios, vazamentos danosos e outras situações de emergência;
- volume e qualidade dos insumos básicos, de pessoal e de tráfego gerados;
- padrões de uso e de ocupação do solo e
- disponibilidade nas redes de energia elétrica, água, esgoto e comunicações.

De acordo com o parágrafo único do referido artigo, “o licenciamento previsto no “caput” deste artigo é da competência dos órgãos estaduais de controle da poluição e não exclui a exigência de licença para outros fins”.

Mas foi a Lei 6938 de 31 de agosto de 1981 /1/ que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente, a qual introduziu o licenciamento ambiental na legislação federal.

O artigo 10 dessa lei dispõe que “a construção, instalação, ampliação e funcionamento de estabelecimentos e atividades utilizadoras de recursos naturais, considerados efetiva ou potencialmente poluidores, bem como capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental, dependerão do prévio licenciamento do órgão estadual competente, integrante do Sistema Nacional do Meio Ambiente - SISNAMA, e do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Renováveis - IBAMA, em caráter supletivo, sem prejuízo de outras licenças exigíveis.”

No parágrafo 4, artigo 10, tem-se que a incumbência do licenciamento prévio de instalações nucleares pertence ao Poder Executivo Federal, com a audiência dos Governos Estaduais e Municipais.

No parágrafo 4, artigo 20, outorga-se à CNEN a competência de conceder licenças ambientais para instalações nucleares, mediante parecer da SEMA, ouvidos os órgãos de controle ambiental estaduais e municipais.

Até então, a legislação vigente era inequívoca quanto ao licenciamento ambiental de instalações nucleares. Mas, em 18 de julho de 1989, foi editada a lei 7804 /1/ que alterou vários dispositivos da lei 6938/81.

O artigo 10 da lei 6938 foi modificado, resultando na seguinte sentença: “a construção, instalação, ampliação e funcionamento de estabelecimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais, considerados efetiva ou potencialmente poluidores ... dependerão do prévio licenciamento do órgão estadual competente, integrante do Sistema Nacional do Meio Ambiente - SISNAMA e do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais - IBAMA, em caráter supletivo, sem o prejuízo de outras licenças exigíveis.”

Já no parágrafo 4, a competência do licenciamento prévio de atividades e obras com significativo impacto ambiental, de âmbito nacional ou regional, passa a ser do IBAMA. A substituição do termo “instalações nucleares” por “atividades e obras com significativo impacto ambiental” gerou uma interpretação subjetiva no que se refere a “significativo impacto ambiental”.

No referido artigo, a ação do IBAMA teria caráter supletivo, ou seja, somente tomaria lugar no caso de omissão do órgão licenciador estadual. Desse modo, a atuação do Poder Público no licenciamento ambiental ficou mais restrita, deixando de

ser exclusiva para ser supletiva, ainda assim, sendo exercida somente quando o impacto ambiental for significativo.

No artigo 19, parágrafo 4 do decreto 99274 /2/, consta a competência da CNEN, mediante parecer do IBAMA, e ouvidos os órgãos de controle ambiental estaduais e municipais, no licenciamento de instalações nucleares. Há controvérsias no que diz respeito à postura do IBAMA, que se limita a um simples parecer no licenciamento nuclear, pois o quesito ambiental transcende o aspecto nuclear /11/.

A Política Nacional do Meio Ambiente foi introduzida na legislação brasileira pela lei 6938 de 31 de agosto de 1981 /1/, e seus princípios básicos são a "racionalização do uso do solo, do subsolo, da água e do ar", do "planejamento e fiscalização do uso dos recursos ambientais" e do "controle e zoneamento das atividades potencial e efetivamente poluidoras". O licenciamento ambiental é um dos instrumentos que garante a aplicabilidade desses princípios.

O decreto 99274, de 10 de maio de 1990 /11/, determina, no seu artigo 17, que qualquer empreendimento potencial ou efetivamente poluidor que utilize recursos ambientais ou que cause degradação ambiental de qualquer espécie dependerá do licenciamento prévio do órgão estadual competente integrante do SISNAMA, sem o prejuízo de outras legalmente exigíveis.

De acordo com o artigo 19 do decreto 99274 /11/, o licenciamento ambiental é dividido em três etapas:

1. Licença Prévia (LP): é a fase mais importante do processo de licenciamento ambiental porque rege a localização do empreendimento, de acordo com os planos municipais, estaduais e federais que regulamentam o uso do solo. Se a LP for negada, todo o processo é encerrado. Nessa etapa, as consequências que a implantação e a operação do empreendimento trarão ao meio ambiente são examinadas, exigindo-se os seguintes documentos: Estudo de Impacto Ambiental - EIA e Relatório de Impacto Ambiental - RIMA.
2. Licença de Instalação (LI): é a fase em que se obtém a autorização para o início da implantação do empreendimento, segundo as especificações do Projeto Executivo aprovado.

3. Licença de Operação (LO): é a fase em que se autoriza o início da atividade da instalação licenciada e o funcionamento dos equipamentos de controle de poluição, de acordo com o determinado na LP e na LI.

2.3.2 - Estudo de Impacto Ambiental

O EIA e o RIMA são os principais instrumentos no licenciamento ambiental pois, segundo a Resolução CONAMA 001/86 /12/, sua elaboração e aprovação pelo IBAMA devem anteceder a expedição das licenças ambientais.

A Resolução CONAMA 006/87 /12/ é clara quando determina no artigo 8, parágrafo 2, que a emissão da LP somente ocorrerá depois da análise e aprovação do RIMA. Logo, essa exigência precede a outorgação da LP.

Consoante o artigo 9 da Resolução CONAMA 001/86/12/, o RIMA concluirá os resultados do estudo de impacto ambiental e terá como conteúdo:

- objetivos e descrição do projeto;
- resultados de estudos ambientais nas áreas de influência do projeto;
- descrição dos prováveis impactos ambientais na implementação e na operação do empreendimento, informando o efeito esperado das medidas mitigadoras a serem aplicadas;
- caracterização da qualidade ambiental futura da área de influência;
- programa de monitoração de impactos e
- alternativas, conclusões e comentários.

O EIA e o RIMA são documentos distintos. O primeiro privilegia informações técnicas que orientam a análise do projeto para a emissão do parecer de órgão técnico, já o segundo visa esclarecer o público interessado e a autoridade político-administrativa concessora da licença. Tanto que o parágrafo único do artigo 10 da Resolução CONAMA 006/87 /12/ determina que “o RIMA, destinado ao esclarecimento do público das vantagens e consequências ambientais do empreendimento, deverá ser elaborado de forma a alcançar efetivamente esse objetivo...”.

A Constituição do Estado de São Paulo, capítulo IV , seção I , artigo 192 , parágrafo 1 , determina que a “outorga de licença ambiental, por órgão ou entidade governamental competente , ... , será feita com a observância dos critérios gerais fixados em lei, além de normas e padrões estabelecidos pelo Poder Público e em

conformidade com o planejamento e zoneamento ambientais". No artigo 2, consoante a legislação federal, reafirma-se a necessidade da aprovação do Estudo Prévio de Impacto Ambiental (e respectivo relatório) para a obtenção da licença ambiental de atividades potencialmente causadoras de significativa degradação do meio ambiente.

Segundo a Resolução SMA 19, de 9 de outubro de 1991 /12/, os Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e os respectivos Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA) devem ser entregues na Secretaria do Meio Ambiente (SMA), pelo empreendedor, em um prazo de 15 dias. O Departamento de Avaliação de Impacto Ambiental (DAIA/SMA) realizará a análise preliminar do estudo a fim de verificar se o mesmo está de acordo com o prescrito na Resolução CONAMA 001/86 /12/.

Seguida à análise preliminar, o DAIA/SMA dá sequência à análise do IEA/RIMA, no prazo de 3 meses (esse período pode ser estendido).

Finda essa fase, o DAIA/SMA, através de Parecer Técnico e Súmula, indica a aprovação, reprovação ou aprovação com exigências do IEA/RIMA.

Assim, o licenciamento ambiental de um empreendimento deverá ser requerido junto ao IBAMA, que se encarregará da audiência dos demais envolvidos no processo, tais como a CNEN e o Estado de São Paulo, sendo que, embora os pareceres do Estado e do Município sejam considerados durante o processo de licenciamento, estes não possuem competência para intervir diretamente na questão.

2.4 - Conclusões

Conforme visto nas seções anteriores, verifica-se que tanto o processo de licenciamento nuclear como o ambiental exigem, de formas distintas e independentes, estudos que comprovem a segurança da instalação e demonstrem que o impacto ambiental e para a população, resultantes da construção e operação da planta, são mantidos em níveis aceitáveis.

Esses estudos envolvem necessariamente a aplicação de técnicas de análise de perigos para a quantificação das consequências (sobre a saúde humana, sobre o meio ambiente e sobre a planta) e para oferecer subsídios na avaliação da segurança da instalação nas fases de projeto e operação.

CAPÍTULO 3

AVALIAÇÃO DE PERIGOS

3.1 - Introdução

A avaliação de perigos de uma instalação tem por objetivo identificar os problemas de segurança que possam comprometer a saúde das pessoas (trabalhadores e indivíduos do público) e causar impactos indesejáveis ao meio ambiente e à própria planta ou danos à propriedade. A avaliação de perigos faz parte de um processo mais geral denominado avaliação de riscos que, basicamente, compreende as etapas ilustradas na figura 3.1.

O primeiro passo da avaliação de riscos consiste na identificação dos perigos potenciais da planta em estudo, analisando-se as suas causas e efeitos sobre o meio ambiente e sobre a operação da instalação. A caracterização dos riscos é a 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 medidas para reduzi-lo a um valor tolerável, como, por exemplo, alterações de projeto. Mesmo que o risco seja aceitável, deve ser proposto um plano de gerenciamento de riscos para ser aplicado durante a operação normal da planta e em situações de emergência /13/.

A avaliação de perigos é uma ferramenta importante para a obtenção de licenças junto aos órgãos de controle ambiental e nuclear, podendo também ter outras aplicações como, por exemplo, dar subsídios na administração de seguros (negociação de prêmios) /14/.

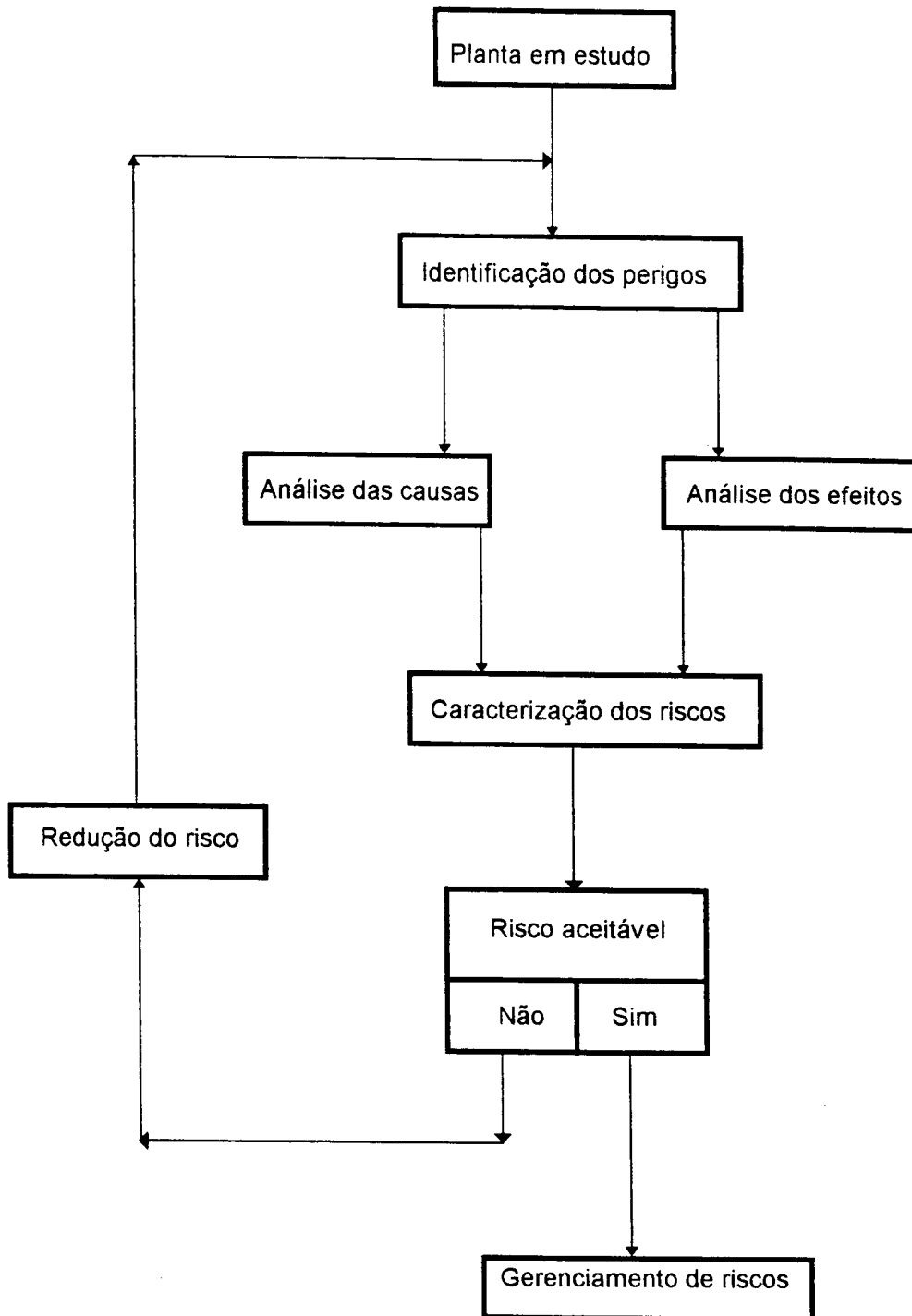


Figura 3.1: Principais etapas da avaliação de riscos.

3.2 - Considerações gerais sobre riscos

3.2.1 - Identificação de perigos

Os perigos de uma instalação podem estar associados à ocorrência de incêndios, explosões, vazamentos de substâncias tóxicas, radiação nuclear e outros, conforme ilustrado na figura 3.2.

Incêndio

O incêndio é resultado de uma reação de combustão descontrolada, liberando energia térmica, podendo haver a emissão de gases tóxicos /15/. Os danos causados por um incêndio incluem perdas materiais por combustão, destruição ou comprometimento de estruturas por radiação térmica e prejuízos à saúde humana por intoxicação pela fumaça, queimaduras ou mesmo a morte.

Os materiais que apresentam perigo de incêndio são sólidos finamente divididos, líquidos com baixo ponto de fulgor e gases inflamáveis. Esses materiais, geralmente, são de origem orgânica e devem ser armazenados em locais refrigerados e ventilados (para prevenir ignição acidental) e afastados de agentes oxidantes ou substâncias que reajam exotermicamente com a umidade do ar.

Explosão

A explosão pode ter as seguintes origens:

- Química: resultado de uma reação química extremamente rápida, produzindo simultaneamente grandes quantidades de gases e energia /16/;
- Física: a energia liberada é consequência de um processo físico (como, por exemplo, a ruptura de um vaso pressurizado);
- Nuclear: a energia liberada é consequência reações de fusão ou fissão nuclear.

Devido a energia gerada em uma explosão, os gases liberados expandem-se com altas velocidades, provocando o deslocamento do ar circunvizinho e ocasionando uma sobrepressão capaz de destruir estruturas e causar prejuízos à saúde humana,

como a ruptura de tímpano. As explosões podem acontecer em áreas confinadas ou abertas.

As explosões podem apresentar diferentes características:

- Detonação: a velocidade de expansão dos gases liberados é muito superior à velocidade do som naquele meio;
- Deflagração: os gases liberados expandem-se com velocidades no máximo iguais a do som, podendo ocorrer reação de combustão pois nem todo oxigênio é removido do meio.

Vazamentos

Os vazamentos são liberações de substâncias tóxicas, oxidantes, radioativas, corrosivas, inflamáveis, explosivas ou atóxicas. As liberações de materiais atóxicos também podem ser perigosas, dependendo das suas condições de pressão e temperatura /17/. Os vazamentos podem ocorrer com substâncias nos estados líquido ou gasoso, em locais confinados ou liberações para o ambiente, conforme ilustrado na figura 3.3.

Radiação Nuclear

O perigo representado pela radiação nuclear se deve à incidência de radiação direta ou à incorporação de substâncias radioativas pelo organismo. Os efeitos da radiação dependem da intensidade da radiação emitida pelo radionuclídeo liberado, do seu tempo de meia vida e do tempo de exposição do indivíduo.

Outros

O item "outros", citado na figura 3.2, refere-se a eventos externos a planta, que podem ser originados por quedas de aviões, tornados, etc. Por exemplo, no caso da URENCO em Almelo, identificou-se a queda de um avião de caça Phantom sobre a área de depósito de cilindros como sendo um perigo de ocorrência de incêndio, em virtude da proximidade de bases militares /18/.

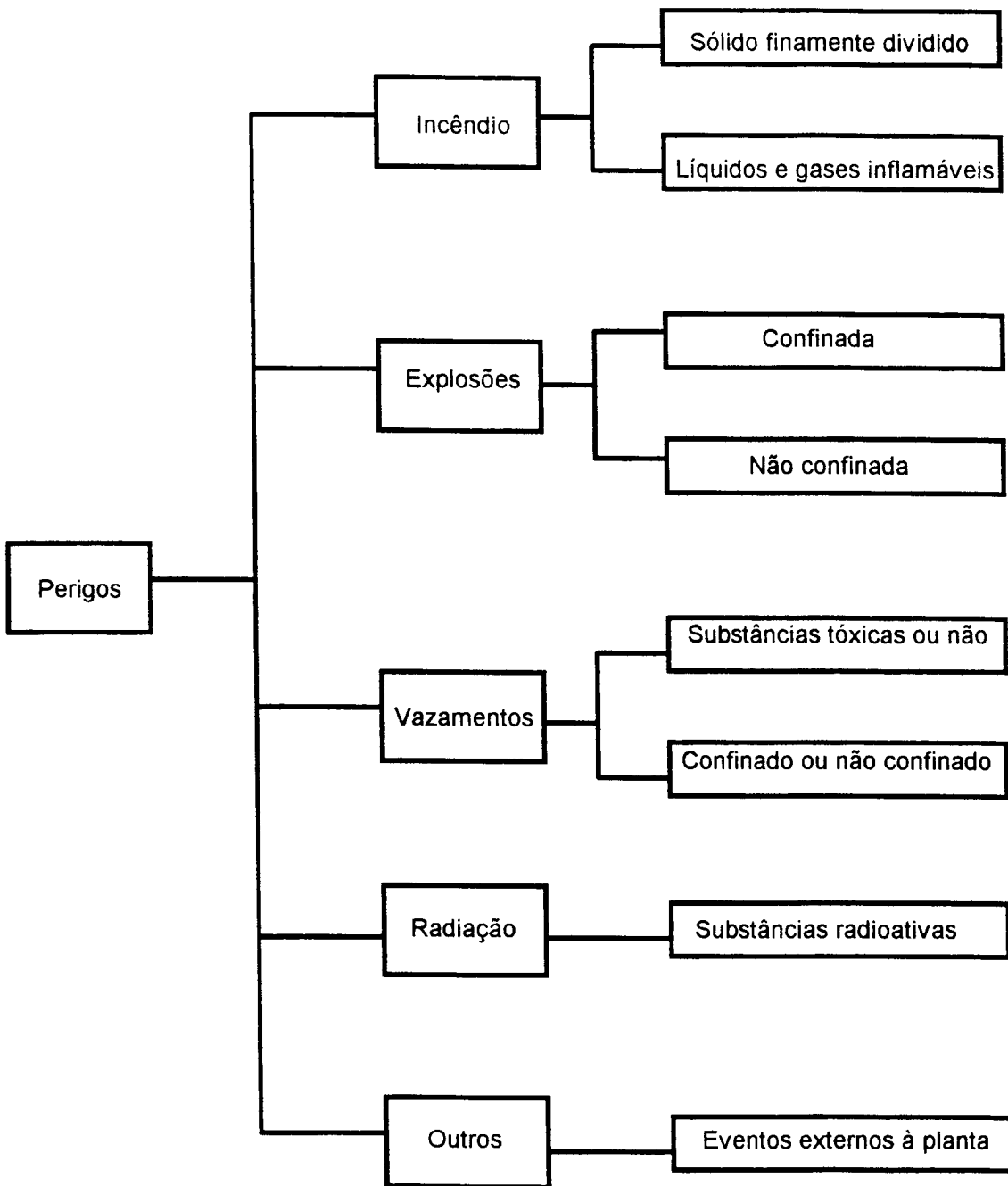


Fig. 3.2: Perigos associados a uma instalação.

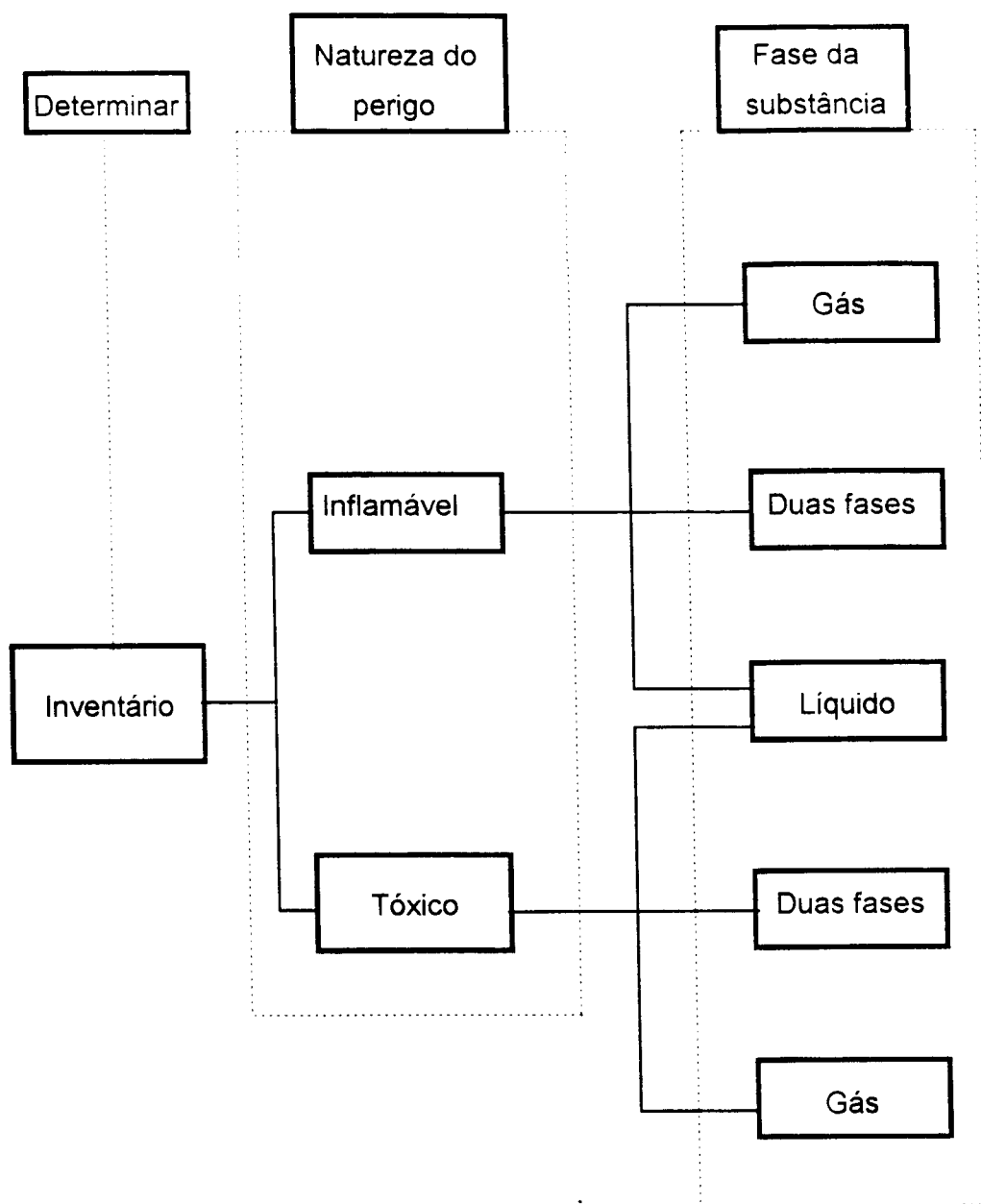


Figura 3.3: Tipos de vazamentos de substâncias perigosas.

3.2.2- Efeitos da exposição a substâncias tóxicas

As vias de exposição pelas quais uma substância tóxica e/ou radioativa pode atingir o ser humano são: inalação (pelo ar ou pelo solo); ingestão (através de partículas do solo, de alimentos e da água e peixes) e absorção dérmica (pelo ar, solo e água) /19/. No caso de substâncias radioativas, deve ser considerada a incidência de radiação direta. A figura 3.4 ilustra as principais vias de exposição.

De acordo com manifestações de uma substância no organismo, estas são classificadas como /20/, /21/:

- Irritantes: substâncias solúveis em água que causam irritação nos tecidos do trato respiratório, pele e olhos.
- Asfixiantes simples: geralmente são gases que, em altas concentrações, reduzem, por diluição, a concentração de oxigênio no ar, podendo causar cefaléia, tontura fadiga muscular, náusea, vômito, inconsciência ou mesmo a morte. Tais substâncias não são absorvidas pelo organismo.
- Asfixiantes químicos: substâncias que impedem o deslocamento de oxigênio pelo organismo.
- Anestésicas: substâncias que afetam o sistema nervoso central, interferindo na transmissão de impulsos nervosos, além de efeitos narcóticos que podem ocasionar inconsciência ou coma.
- Alergênicas: substâncias que geram reações alérgicas, com efeitos mais significativos em pessoas pré-dispostas.
- Mutagênicas: substâncias que induzem alterações genéticas no DNA dos cromossomos.
- Carcinogênicas: substâncias que geram câncer.
- Teratogênicas: substâncias que causam alterações no desenvolvimento fetal.

Uma substância, quando incorporada ao organismo, direciona-se preferencialmente para determinado órgão ou sistema. As substâncias lipossolúveis são absorvidas pelos tecidos (cuja constituição básica são lipídeos e proteínas). Já as hidrossolúveis, como o ácido fluorídrico, lesam principalmente o sistema respiratório superior. No caso da inalação do UF_6 , este sofre hidrólise nos pulmões, formando UO_2F_2 (um dos compostos do urânio de mais alta solubilidade) e HF. O efeito tóxico mais danoso do UO_2F_2 ocorre nos rins (ver seção 4.4.6.1.3). Já HF, quando inalado, causa graves problemas nos pulmões (ver seção 4.4.6.1.4). A figura 3.5 mostra os caminhos de substâncias tóxicas no organismo.

A ação tóxica de uma substância faz com que o organismo reaja através de uma série de vias de excreção e eliminação, além de processos metabólicos, que reduzem a concentração do agente tóxico no corpo humano. A toxicidade efetiva de uma substância é, portanto, o resultado da toxicidade inerente dessa substância descontando-se as reações funcionais e bioquímicas do organismo, conforme ilustrado na figura 3.6.

O potencial de perigo à saúde apresentado por uma substância química é o resultado da 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.

Os efeitos adversos à saúde podem ser classificados em agudos ou crônicos. Os efeitos agudos correspondem às patologias 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 a 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. Os estados patológicos resultantes de exposições crônicas podem levar meses ou anos para se manifestarem. Os efeitos tóxicos crônicos à saúde são irritações, doenças ou mesmo a morte (17).

3.2.3- Limites de Tolerância

Os limites de tolerância correspondem às concentrações de agentes químicos, intensidades de agentes físicos ou doses de radiação, presentes no ambiente de trabalho ou em uma situação acidental, que têm por objetivo garantir a proteção da saúde humana. Logo, esses limites são determinados para exposições ocupacionais (durante a rotina laboral) e acidentais (durante breve período de tempo).

Estes limites não são absolutos, refletindo os conhecimentos em um dado momento, as características do trabalho de cada país e as condições e métodos utilizados na sua definição.

Entre os índices aceitos internacionalmente estão os seguintes:

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

Uma discussão a respeito desses índices, além de outros, é realizada a seguir, sendo que, no Capítulo 4, são apresentados os valores de limites de tolerância utilizados neste trabalho no caso de exposições aos produtos de hidrólise do UF₆ (HF e UO₂F₂).

IDLH

O IDLH, estabelecido pelo “National Institute for Occupational Safety and Health” (NIOSH) /22/, define a máxima concentração de uma substância, liberada durante um intervalo de 1800 s (30 min), sem que essa liberação cause sintomas ou danos 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 pela NIOSH IDLH são mais protetivos à saúde que os do “Lethal Concentration to 50 Percent of Exposure Subjects” (LD₅₀), utilizado para expressar a toxicidade a curto prazo de uma substância.

No caso do urânio, o LD₅₀ corresponde à concentração de $1,63 \cdot 10^{-6}$ kg de U por quilo de peso de uma pessoa. Considerando o período de 900 s (15 min) de exposição, a concentração equivalente ao valor IDLH para o HF é $35 \cdot 10^{-6}$ kg/m³ e a incorporação de U é $10 \cdot 10^{-6}$ kg /6/.

TLVs

Os TLVs são parâmetros desenvolvidos pela “American Conference of Governmental Industrial Hygienists” (ACGIH) /23/ 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 adversos à saúde. Os limites de tolerância são guias para os profissionais da área de segurança industrial, não correspondendo a valores rígidos de distinção entre concentrações seguras e perigosas.

Há três categorias de TLVs, conforme descrito a seguir :

- Média ponderada pelo tempo ("Time Weighted Average" - TWA): concentração média ponderada pelo tempo de uma substância no ar para uma jornada de trabalho de 8 horas diárias na qual os trabalhadores podem estar expostos continuamente, dia após dia, sem efeitos adversos.
- Exposição curta ("Short-term Exposure Limit" - STEL): concentração de uma substância no ar na qual os trabalhadores podem estar expostos continuamente por curto período de tempo (900 s ou 15 min) sem sofrer irritações, danos crônicos ou irreversíveis aos tecidos e narcose.
- Valor teto ("Ceiling" - C): concentração de uma substância no ar que não deve ser excedida em nenhum momento durante a jornada de trabalho.

ERPG

Os valores de ERPG são desenvolvidos pela "American Industrial Hygiene Association" (AIHA) /24/ e podem ser utilizados como parâmetros na classificação dos impactos sobre a saúde humana (consequências toxicológicas) de substâncias dispersas na atmosfera.

Há três classes de ERPG, segundo a descrição abaixo:

- ERPG1: máxima concentração de uma substância no ar em que praticamente todos os indivíduos possam estar expostos por períodos superiores a 3600 s (1 hora) sem que ocorram efeitos transientes adversos à saúde ou percepção de odor desagradável.
- ERPG2: máxima concentração de uma substância no ar em que praticamente todos os indivíduos possam estar expostos por períodos superiores a 3600 s (1 hora) sem

o desenvolvimento de efeitos irreversíveis à saúde ou impedimento de tomada de ações de proteção individual.

- ERPG3: máxima concentração de uma substância no ar em que praticamente todos os indivíduos possam estar expostos por períodos superiores a 3600 s (1 hora) sem que ocorram situações de ameaça à vida humana.

Outros

São descritos a seguir outros três parâmetros utilizados na determinação dos limites de tolerância de um substância:

- “Emergency Exposure Guidance Level” (EEGL): esse limite de tolerância é atualmente estabelecido pela “National Academy of Science” (NAS) mas foi originalmente desenvolvido por militares. O EEGL fornece uma orientação para se estabelecer o máximo nível (concentração no ar) de um substância para uma única exposição em situação de emergência, por trabalhadores, em dado intervalo de tempo, como 1800 s (30 min) ou 3600 s (60 min). A adoção do EEGL apenas é permitida para exposições em que não haja a expectativa de se ocasionarem danos irreversíveis à saúde ou de se afetarem as capacidades mentais do ser humano (garantindo a capacidade de auto-proteção do indivíduo em circunstâncias de perigo).
- “Level of Concern” (LOC): corresponde à máxima concentração, no ar, de uma substância extremamente perigosa acima da qual possam ser verificados efeitos irreversíveis à saúde, ou mesmo morte, como resultado de uma única exposição por um período de tempo relativamente curto. Esse índice é estabelecido pela “Environmental Protection Agency” (EPA).
- “Permissible Exposure Limit” (PEL): é estabelecido pela “Occupational Safety and Health Administration” (OSHA) e tem como objetivo assegurar a saúde dos trabalhadores expostos a substâncias químicas dispersas no ar. Analogamente aos TLVs, são definidas três categorias de PELs: o PEL-TWA (utilizado para exposições contínuas por longo período de tempo), o PEL-STEL (adequado para exposições contínuas por curto período de tempo, ou seja, 900 s) e o PEL-C (usado para exposições agudas).

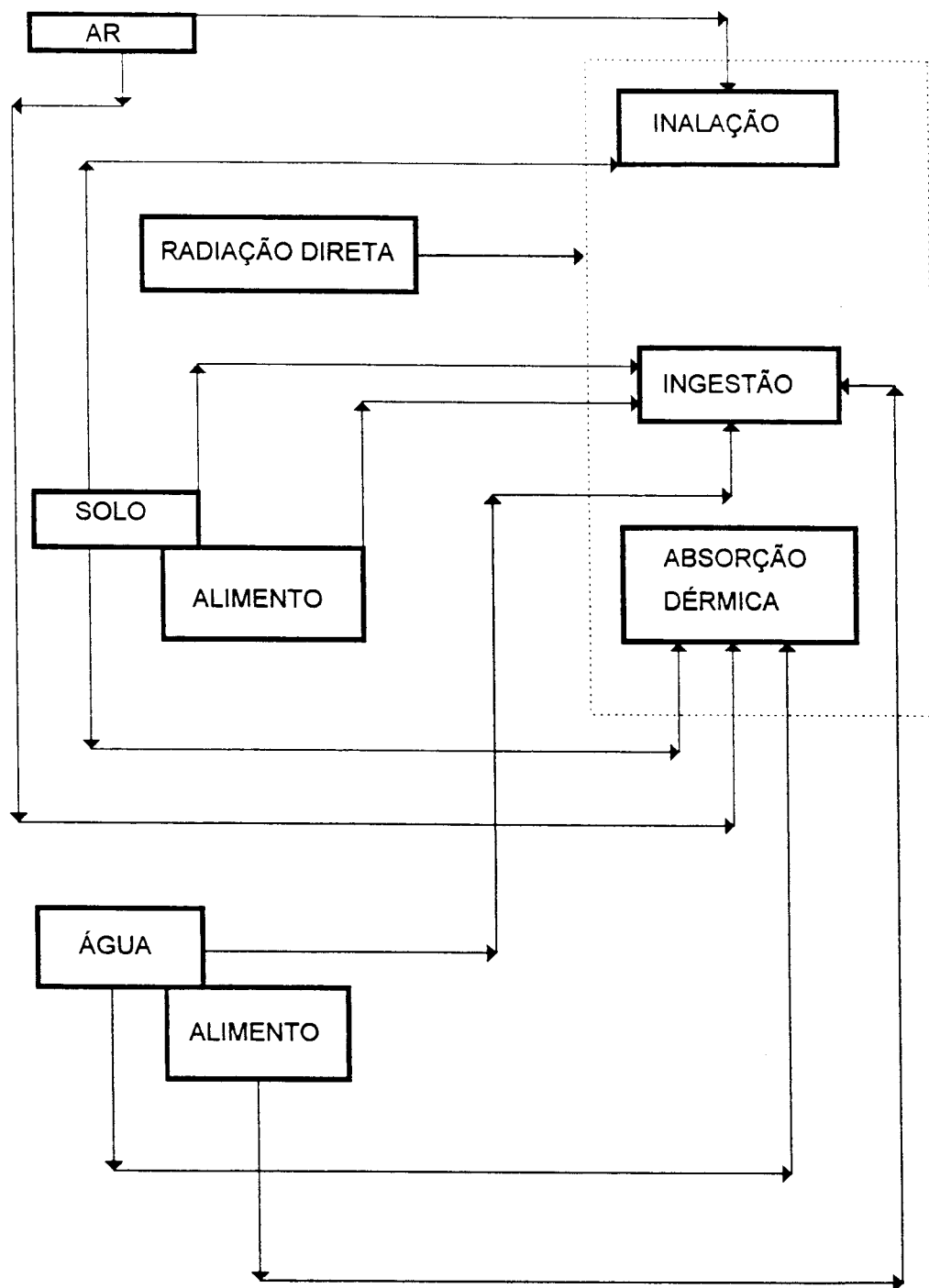


Figura 3.4: Principais vias de exposição a substâncias tóxicas.

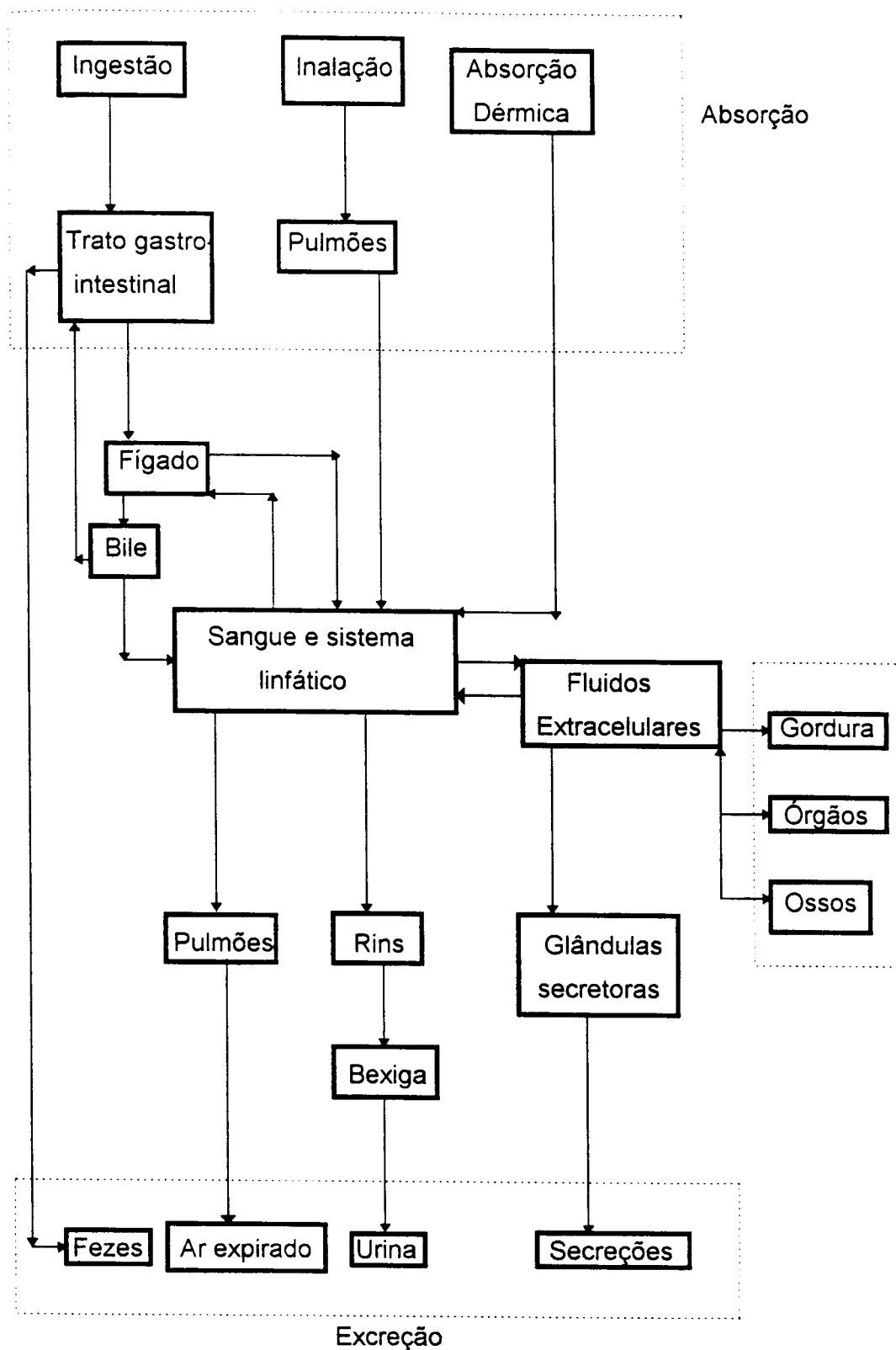


Figura 3.5: Caminhos das substâncias tóxicas no organismo.

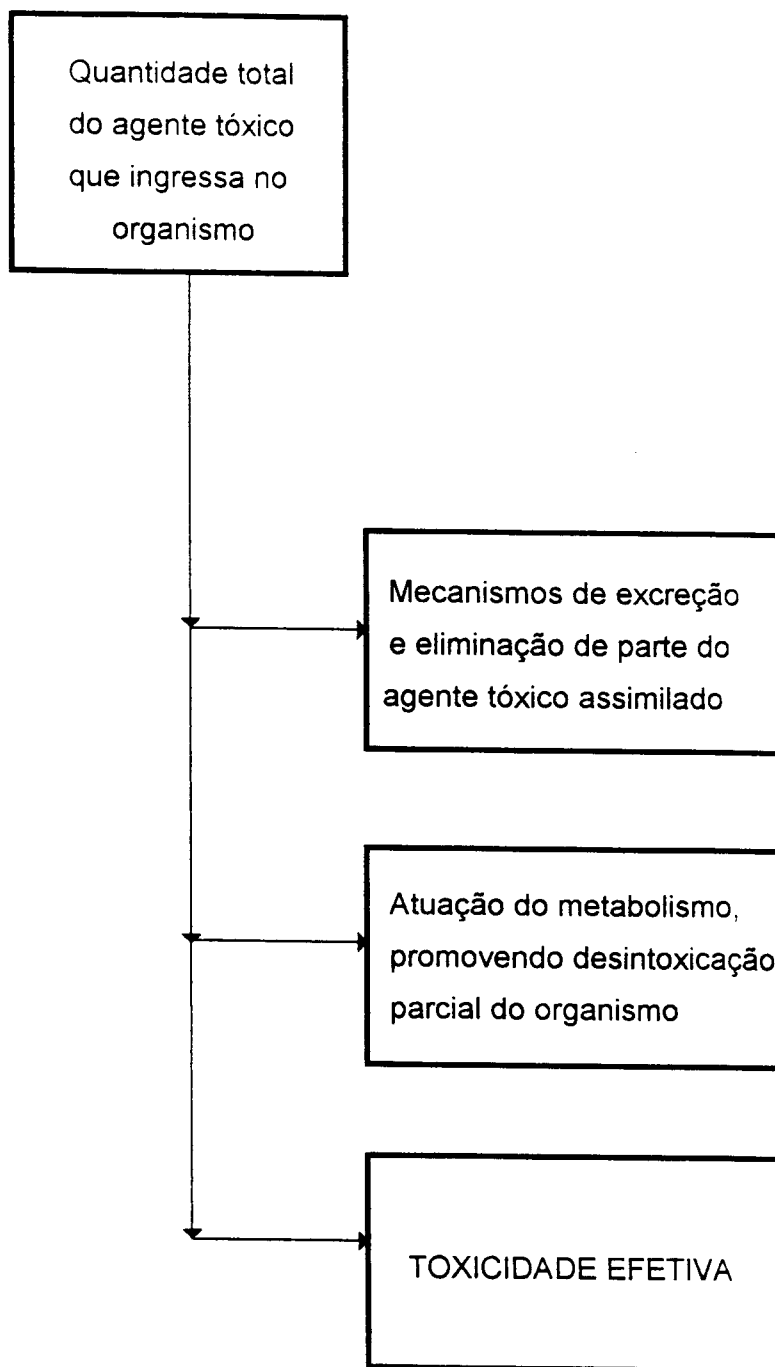


Figura 3.6: Toxicidade efetiva de uma substância no organismo.

3.2.4 - Caracterização de perigos

É a etapa da avaliação de perigos em que as consequências dos eventos são classificadas em categorias, de acordo com seus níveis de gravidade.

Hannaman et alli /25/ propõem 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. Essa nomenclatura coincide com a apresentada na norma 5481.1B do "Department of Energy" (DOE) /26/.

A sistemática empregada em /25/ avalia as consequências dos eventos de acordo com os seguintes critérios específicos: 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 4, a mesma é aplicada a uma usina de enriquecimento isotópico de urânio.

3.2.4.1 - Impactos sobre a saúde humana

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

Consequências radiológicas

As consequências radiológicas dependem dos efeitos fisiológicos da radiação. Na tabela 3.1 as categorias são determinadas em função das doses observadas no sítio 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 /27/.
- 1 Sv: Dose em que o risco de fatalidades imediatas nos indivíduos expostos é desprezível /27/.
- 0,25 Sv: Dose em que não se observam efeitos fisiológicos imediatos, como vômitos, náuseas ou diarreia, nos indivíduos expostos /6/.
- 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 /28/.

Consequências toxicológicas

As categorias de consequências toxicológicas são definidas, na tabela 3.2, através de três grupos (dados por valores de limites de tolerância). A “Westinghouse Savannah River Company” (WSRC) /29/, recomenda a utilização dos valores de ERPG3, ERPG2 e ERPG1, dados pela AIHA /24/, 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 WSRC sugere a adoção de parâmetros alternativos, segundo a descrição da tabela 3.3.

Neste trabalho são adotados os valores dos TLVs da ACGIH /23/ e do IDLH da NIOSH /22/, além do ERPG, para a definição de cada grupo no caso do urânio solúvel e do HF (produtos de interesse no presente estudo), conforme apresentado no Capítulo 4.

Outro sistema de classificação de consequências toxicológicas é o utilizado pela USNRC, proposto no documento NUREG 1391 /6/. No relatório de segurança da usina Claiborne Enrichment Center /10/, por exemplo, foram definidas duas categorias de eventos (evento anormal ou acidente), derivadas dos resultados expostos em /6/. Esse critério também é utilizado na tabela 4.10 deste trabalho para classificar as consequências de liberações que envolvem UF_6 .

3.2.4.2 - 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 3.4). Causas típicas que acarretam contaminação ambiental são: derramamentos de substâncias, liberações acidentais para a atmosfera e rompimentos de tanques.

3.2.4.3 - Impactos programáticos

Os impactos programáticos são importantes no gerenciamento financeiro de perigos, pois estão relacionados com as consequências sobre a instalação em termos de prejuízos monetários ou de interrupções na programação normal da unidade.

As consequências das perdas financeiras são classificadas, na tabela 3.5, em função das quantias gastas, em dólares, com o reparo ou reposição de componentes ou equipamentos da planta.

As consequências sobre a operação normal da planta são classificadas, na tabela 3.6, de acordo com o tempo necessário para a retomada da rotina da instalação.

3.2.5 - Gerenciamento de perigos

O gerenciamento de perigos corresponde a medidas técnicas e administrativas que, em função dos resultados de uma análise de perigos, são tomadas para: evitar a ocorrência de eventos indesejáveis; reduzir a magnitude e/ou a frequência de efeitos adversos à saúde e ao meio ambiente; diminuir a vulnerabilidade da exposição de pessoas e propriedades e minimizar as consequências de um acidente /30/, /31/.

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

- adoção de sistemas de supervisão, controle e segurança nas operações consideradas críticas;
- adoção normas e padrões restritivos na fabricação e montagem de sistemas, equipamentos e estruturas;
- adoção de critérios de controle 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 /13/.

3.2.6 - ISO14000

Atualmente, as empresas estão utilizando como certificado de padrão de qualidade para sistemas de produção e serviços a série de normas ISO14000, desenvolvidas pela International Organization for Standardization (ISO), que fornecem uma estrutura para gerenciar impactos ambientais /32/. As normas incluem disciplinas ambientais como sistema de gestão básico, auditoria, avaliação de desempenho, rotulagens, avaliação do ciclo de vida e inclusão de aspectos ambientais em normas de produtos.

Há dois tipos de normas: de diretriz (documentos descritivos) e especificação (requisitos prescritivos). No caso da ISO14000, apenas a norma ISO14001 é de especificação. Logo, as empresas interessadas se registram na ISO14001, que é um modelo de Sistema de Gerenciamento Ambiental (SGA).

Antes de decidir se uma instalação pode aplicar uma norma, o documento diretriz recomenda que seja realizada uma pré-avaliação que inclui a verificação do cumprimento a requisitos legais bem como uma avaliação dos impactos ambientais advindos das atividades desenvolvidas.

A norma ISO14004 prevê a avaliação da instalação através da aplicação de técnicas de análise de perigos para se verificar as possíveis modificações ambientais resultantes da operação da planta.

O SGA é operacionalizado pelo Programa de Gerenciamento Ambiental (PGA), que é um instrumento gerencial dinâmico, com metas a serem alcançadas em prazos definidos. O PGA é essencial para que a empresa possa prever e satisfazer expectativas de desempenho ambiental, assegurar conformidade com regulamentações nacionais e internacionais e garantir a implementação de medidas em situações emergenciais.

A aplicabilidade da ISO 14000 é vasta, englobando todos os tipos de organizações, incluindo os setores de serviços e de manufatura.

Tabela 3.1: Impactos sobre a saúde: consequências radiológicas /25/.

Categoria	Consequências radiológicas
R1 - Desprezível	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dose menor ou igual a 0,005 Sv fora dos limites de propriedade. 2. Dose menor ou igual a 0,25 Sv no sítio.
R2 - Marginal	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dose maior que 0,005 Sv fora dos limites de propriedade. 2. Dose maior que 0,25 Sv no sítio.
R3 - Crítica	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dose maior que 0,25 Sv fora dos limites de propriedade. 2. Dose maior que 1 Sv no sítio.
R4 - Catastrófica	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dose maior que 1 Sv fora dos limites de propriedade. 2. Dose maior que 5 Sv no sítio.

Tabela 3.2: Impactos sobre a saúde: consequências toxicológicas /25/.

Categoria	Consequências toxicológicas
T1 - Desprezível	<ol style="list-style-type: none"> 1. Exposição ao público menor que GRUPO 3. 2. Exposição no sítio menor que GRUPO 2. 3. Exposição no local do evento menor que GRUPO 1.
T2 - Marginal	<ol style="list-style-type: none"> 1. Exposição ao público maior que GRUPO 3. 2. Exposição no sítio maior que GRUPO 2. 3. Exposição no local do evento maior que GRUPO 1.
T3 - Crítica	<ol style="list-style-type: none"> 1. Exposição ao público maior que GRUPO 2. 2. Exposição no sítio maior que GRUPO 1.
T4 - Catastrófica.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Exposição ao público maior que GRUPO 1.

Tabela 3.3: Parâmetros recomendados pela WSRC /29/ na determinação dos grupos, em ordem hierárquica.

Guia Primário	GRUPO	Parâmetros Alternativos	Fonte dos parâmetros
ERPG3	1	ERPG3 EEGL (1800 s) IDLH	AIHA NAS NIOSH
ERPG2	2	ERPG2 EEGL (3600 s) LOC PEL-C TLV-C	AIHA NAS EPA OSHA ACGIH
ERPG1	3	ERPG1 PEL-STEL TLV-STEL	AIHA OSHA ACGIH

Tabela 3.4: Impactos sobre o meio ambiente /25/.

Categoria	Consequências sobre o meio ambiente
A1 - Desprezível	Contaminação interna à planta facilmente eliminada. Prejuízos inferiores a 50.000 dólares.
A2 - Marginal	Contaminação interna à planta mas mínima contaminação do solo. Prejuízos entre 50.000 e 1.000.000 de dólares.
A3 - Crítica	Contaminação interna à planta e do solo. Prejuízos entre 1.000.000 e 10.000.000 dólares.
A4 - Catastrófica	Liberações de quantidades indesejáveis de contaminantes para o meio ambiente. Prejuízos superiores a 10.000.000.

Tabela 3.5: Impactos devidos a prejuízos financeiros /25/.

Categoria	Consequências financeiras
F1 - Desprezível	Danos que requerem apenas a reposição de equipamentos de importância secundária. Prejuízos inferiores a US\$ 50.000.
F2 - Marginal	Danos que requerem a reposição/reparo de equipamentos de importância fundamental ou pequenos danos estruturais. Prejuízos entre US\$ 50.000 e US\$ 1.000.000.
F3 - Crítica	Danos que requerem reparos extensivos na instalação. Prejuízos entre US\$ 1.000.000 e US\$ 10.000.000.
F4 - Catastrófica	Comprometimento total da instalação. Prejuízos superiores a US\$ 10.000.000.

Tabela 3.6: Impactos sobre a operação da planta /25/.

Categoria	Consequências sobre a operação da planta
P1 - Desprezível	Falhas que não causam desvios no processo desenvolvido. Retomada da rotina da planta em período inferior a 7 dias.
P2 - 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 e 90 dias.
P3 - Crítica	Comprometimento extensivo do processo desenvolvido. Retomada da rotina da planta em período entre 3 a 12 meses.
P4 - Catastrófica	Comprometimento total do processo desenvolvido. Retomada da rotina da planta em período superior a 1 ano.

3.3 - Métodos de avaliação de perigos

3.3.1 - Análise de modos de falhas e efeitos (AMFE)

A AMFE /33/, /34/ é uma técnica indutiva que, pela análise sistemática dos possíveis modos de falha dos componentes de um sistema, procura determinar as consequências dessas falhas para a instalação, pessoas e meio ambiente. É aplicável nas fases de projeto, construção e operação de uma planta mas é particularmente útil na identificação de problemas de segurança em plantas já existentes.

Os principais passos da AMFE podem ser resumidos na seguinte sequência:

1. Listar os componentes (ítems) do sistema, tais como: válvulas, bombas, tubulações e outros.
2. Identificar os modos de falha de cada item da lista.
3. Determinar os efeitos de cada modo de falha sobre os outros componentes e o impacto resultante sobre o sistema, instalação e meio ambiente.
4. Avaliar o risco associado à falha de cada item. Esta etapa somente é possível quando as probabilidades de ocorrência de cada modo de falha são conhecidas.

Os resultados da AMFE são normalmente apresentados na forma de tabelas que resumem informações consideradas importantes pelo analista. O leitor interessado poderá encontrar em Kumamoto /35/ e McCormick /36/ tabelas com formatos ligeiramente diferentes que ilustram a aplicação desta técnica.

Neste trabalho utilizou-se a formatação ilustrada na tabela 3.7 para se efetuar a análise descrita no Capítulo 4. Na primeira coluna da tabela cita-se o código do item em estudo. Na segunda e na terceira colunas descrevem-se os modos de falha do item, bem como suas causas. Na quarta, na quinta e na sexta colunas discutem-se os efeitos locais (consequências sobre a operação da área onde o evento ocorre), na planta (consequências sobre a operação de toda instalação) e no meio ambiente (consequências sobre os ecossistemas vizinhos). Na sétima coluna citam-se os meios utilizados para a detecção das falhas. Na oitava coluna, os eventos analisados pela AMFE são classificados de acordo com seus níveis de gravidade. No presente trabalho, a gravidade de cada evento é avaliada usando-se a classificação estabelecida nas tabelas 3.4 e 3.6 para se determinar os efeitos sobre o meio ambiente e sobre a operação da planta, respectivamente.

Tabela 3.7: Modelo da tabela padrão utilizada na AMFE

Item	Modo de Falha	Causa da Falha	Deteccção do Evento	Efeitos			Gravidade do Evento
				Local	Planta	Meio Ambiente	
Código do item	Lista dos possíveis modos de falha do item em análise	Eventos que originam as falhas do item em análise	Lista dos meios de deteccção	Consequências sobre a operação da área aonde ocorre o evento	Consequências sobre a operação da planta	Consequências sobre os ecossistemas afetados pelo evento	Classificação da gravidade de acordo com as tabelas 3.4 e 3.6

3.3.2 - Procedimentos para avaliação de perigos

O método de avaliação de perigos utilizado no presente trabalho é semelhante ao proposto em /37/, e o seu procedimento básico pode ser estruturado nas etapas descritas a seguir e representadas esquematicamente na figura 3.7.

ETAPA 1 : Divisão da planta em unidades funcionais

Divisão da planta em unidades arbitrárias de acordo com os processos desenvolvidos, como áreas de alimentação, de cascata, de retirada. No caso de plantas complexas, as unidades podem ser divididas em sub-unidades para facilitar a análise.

ETAPA 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, bombas e outros. Cada componente é analisado a fim de se identificar seus possíveis modos de falha.

ETAPA 3 : Caracterização do inventário dos componentes

O inventário de todos os materiais perigosos presentes nos sistemas e equipamentos é calculado através de balanços de massas e do fluxo do processo. A caracterização desses materiais deve conter as suas propriedades tóxico-químicas e radiológicas, volume ou massa, temperatura, pressão e demais condições operacionais.

ETAPA 4 : Agrupamento dos componentes por inventário

Os componentes que possuem inventários mais significativos de substâncias perigosas são selecionados e agrupados. Apenas aqueles que possuem os maiores inventários são analisados quantitativamente.

ETAPA 5: Identificação dos perigos

Os perigos associados à instalação em estudo podem ser identificados conforme indicado na figura 3.2.

O escopo do presente trabalho inclui apenas a análise dos perigos oriundos da liberação de substâncias tóxicas e radioativas, não abordando os casos de incêndio,

explosões, criticalidade nuclear, eventos naturais severos e eventos humano induzidos. Portanto, apenas são analisadas as consequências toxicológicas e radiológicas de liberações de UF_6 e de seus produtos de hidrólise (HF e UO_2F_2), segundo as etapas descritas a seguir:

ETAPA 5.1: Classificação dos casos de liberação

Liberações que envolvem os mesmos materiais em condições similares, embora em diferentes locais da planta, podem ser agrupadas em uma única classe. Apenas o caso mais limitante é analisado quantitativamente.

ETAPA 5.2: Cálculo das taxas de liberações

As falhas podem ser seguidas por liberações instantâneas ou contínuas de materiais perigosos. De acordo com a natureza do material, o estado físico e a condição de vazamento assumida, deve-se escolher um modelo matemático adequado para o cálculo das quantidades liberadas para o interior da planta e para o meio-ambiente.

ETAPA 5.3: Avaliação das consequências

Corresponde à análise do impacto causado por liberações indesejadas, quantificando-se os efeitos sobre o organismo humano, meio ambiente e a planta.

ETAPA 5.4: Ordenação de resultados

Os resultados da análise de perigos podem ser classificados de acordo com a sua gravidade para a saúde humana, para o meio ambiente e para a planta. Neste trabalho foi utilizado o critério exposto nas tabelas 3.1 e 3.2 na determinação da gravidade das consequências radiológicas e toxicológicas.

Através dessa ordenação de resultados é possível selecionar os eventos indesejáveis que causam os efeitos mais impactantes sobre a operação da planta e sobre o meio ambiente.

ETAPA 5.5: Estimativa da frequência de ocorrência dos eventos postulados

Se houver dados disponíveis a respeito de falhas de componentes, é possível avaliar a frequência de ocorrência dos eventos utilizando-se recursos de análise de

riscos como a árvore de falhas e de eventos. Muitas vezes não é possível se conhecer esses dados e a análise é realizada de forma qualitativa.

ETAPA 5.6: Apresentação dos resultados através de gráficos ou tabelas

Para cada substância existe determinada concentração, incorporação ou dose na qual a mesma não representa perigo à saúde humana e ao meio ambiente. Os critérios utilizados neste trabalho para classificar liberações de UF_6 são os expostos nas tabelas 3.1, 3.2 e 4.10, permitindo que sejam determinadas as consequências radiológicas e toxicológicas dos eventos postulados.

ETAPA 5.7: Interpretação de resultados

Os resultados da análise de perigos permitem identificar os casos de liberação mais críticos, classificá-los como evento anormal ou acidente, verificando-se ou não a necessidade de adoção do Planejamento de Emergência Local.

ETAPA 5.8: Medidas mitigadoras

Pelo estudo das etapas anteriores, podem ser propostas medidas mitigadoras dos riscos de ocorrência de acidentes ou eventos anormais em uma instalação. Para tanto, existem recursos de engenharia que permitem mitigar ou até mesmo eliminar perigos numa planta. 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.

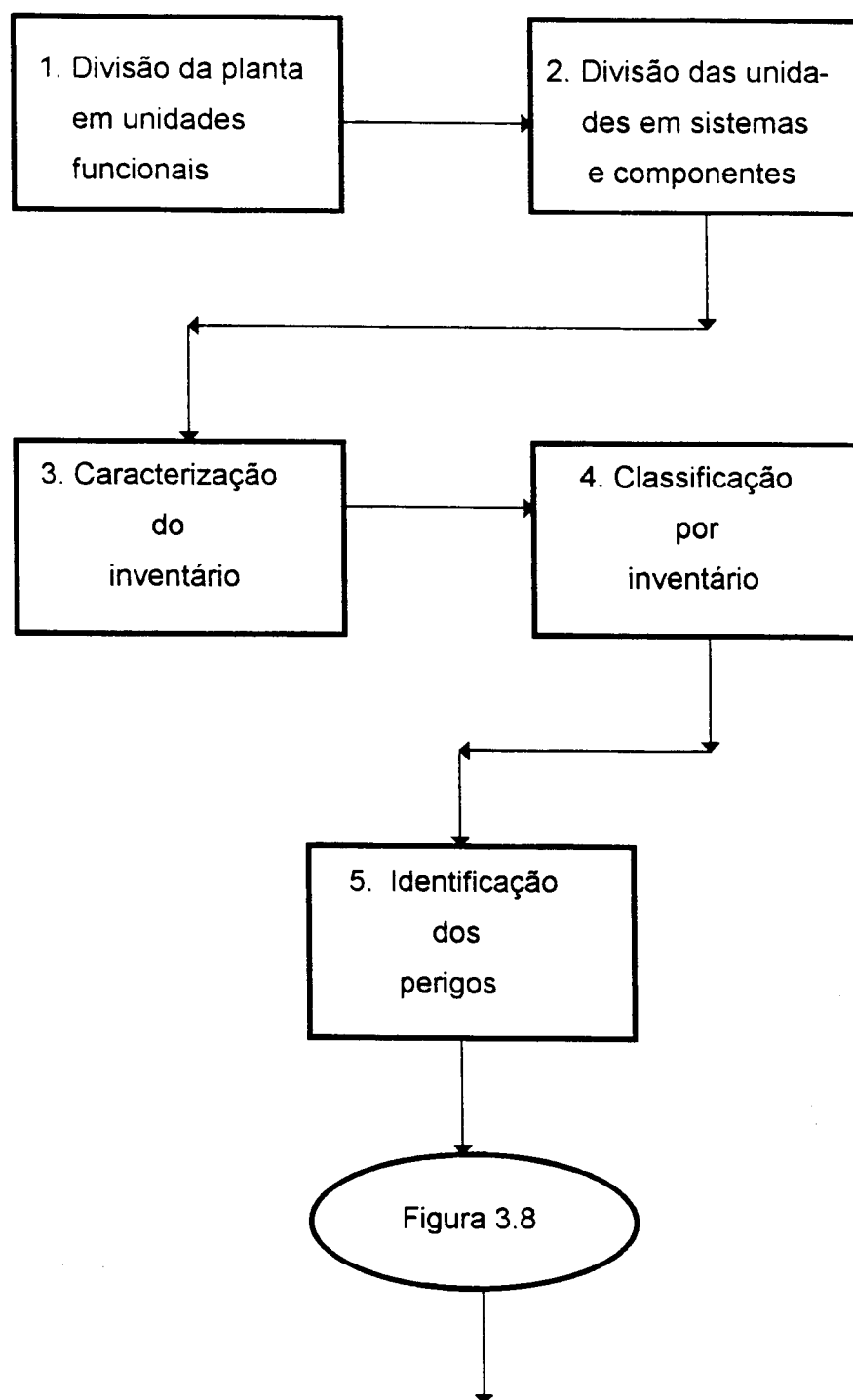


Figura 3.7 : Etapas para a avaliação de perigos.

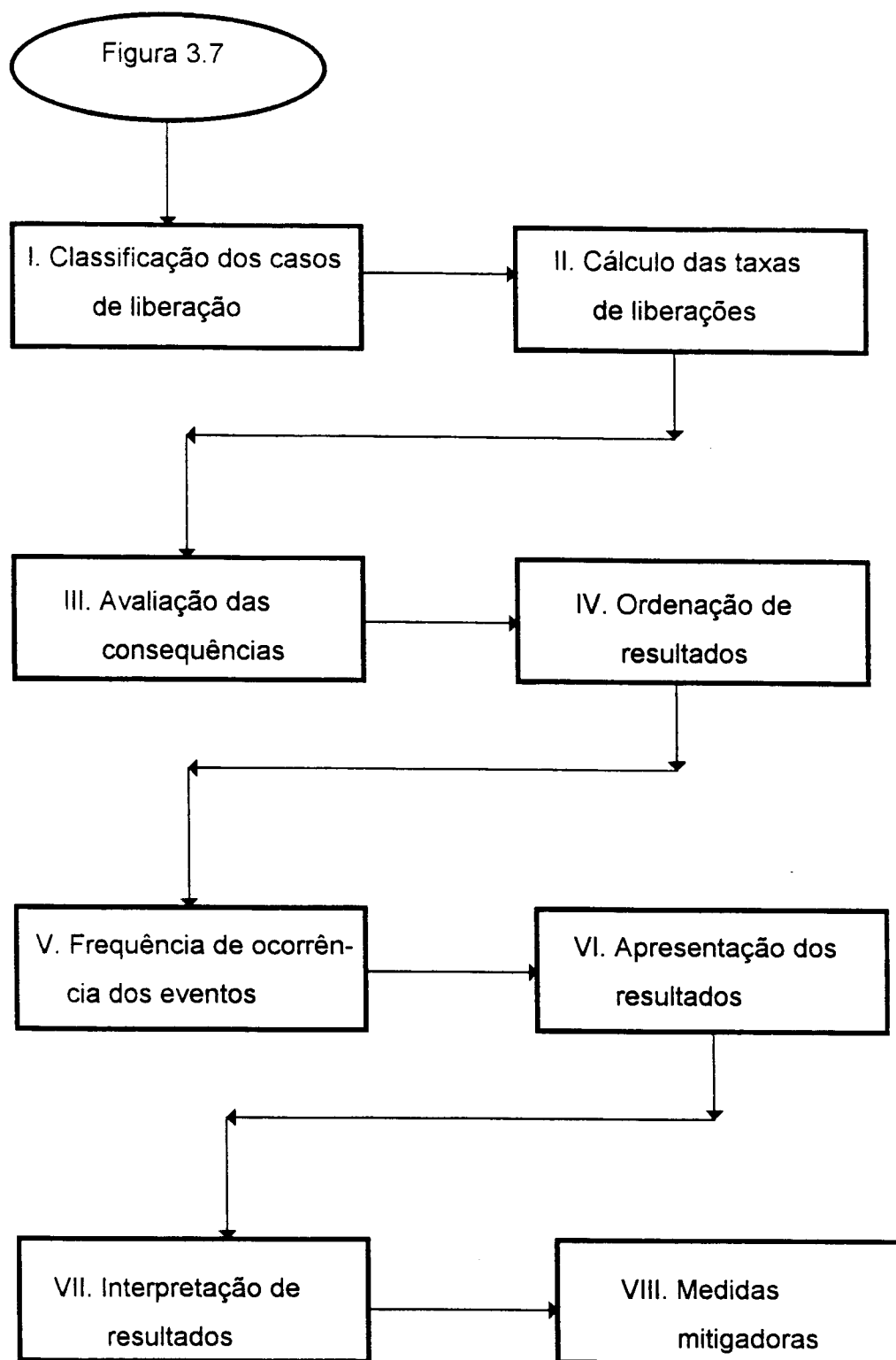


Fig. 3.8: Etapas para a avaliação de perigos no caso de liberação de substâncias.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DE PERIGOS DA PLANTA DE DEMONSTRAÇÃO CPDF

4.1 - Introdução

A instalação escolhida para a aplicação do método de análise de perigos proposto no Capítulo 3 é denominada CPDF (Centrifuge Plant Demonstration Facility). Essa planta, a ser instalada no Laboratório Nacional de Oak Ridge (Tennessee, EUA), baseia-se no processo de enriquecimento isotópico por ultracentrifugação. O relatório K/TS 11.872 ("Preliminary Safety Analysis Report Centrifuge Plant Demonstration Facility Building K-1220") /38/ descreve a CPDF com detalhes suficientes que permitem uma análise de perigos da mesma.

Não é escopo do presente trabalho avaliar criticalidade nuclear, incêndio, explosões, eventos naturais severos e eventos externos. Somente serão estudados eventos internos à instalação, provenientes de falhas em componentes e sistemas, ocasionando vazamento de UF_6 para o interior da planta e liberações para o meio ambiente.

4.2 - Descrição da Instalação

A instalação utiliza como matéria-prima o UF_6 sólido natural (0,7 % em U-235). A sua capacidade de produção anual é cerca de 1800 kg de UF_6 enriquecido a 3,2 % em U-235.

Trata-se, portanto, de uma instalação de demonstração projetada com o objetivo de servir de protótipo no desenvolvimento da tecnologia de ultra-centrífugas com alta eficiência.

4.2.1 - Edificações

O edifício ocupado pela CPDF possui uma área de aproximadamente 7000 m² e abriga os seguintes sistemas e áreas (vide figura 4.1):

- cascata de centrífugas,
- área de alimentação de UF₆,
- área de retirada de produto,
- área de retirada de rejeito,
- sala de controle central munida de rede de computadores para a aquisição de dados sobre todas as áreas da instalação,
- equipamentos auxiliares (equipamentos elétricos e mecânicos, baterias, geradores diesel e outros utilitários),
- utilidades (energia elétrica, ar comprimido, nitrogênio, vapor, água de refrigeração, água sanitária, água de processo e sistema de drenagem),
- quatro áreas de estocagem (três delas sem uso atualmente e uma utilizada na estocagem de componentes para a manutenção de equipamentos),
- escritórios,
- refeitório e
- corredor de transferência.

O prédio possui um corredor de transferência cuja função é permitir o escoamento de materiais e equipamentos vindos de fora do edifício para a área da cascata de centrífugas.

Tanto as áreas que operam com o UF₆ como o corredor de transferência são considerados áreas restritas, estando sujeitos à monitoração e ao controle de exposição à materiais radioativos.

As áreas da CPDF de interesse nesse trabalho são aquelas onde o UF₆ está presente (ou seja, sistema de alimentação, sistema de cascata e sistemas de retirada de produto e de rejeito), devido ao perigo associado à manipulação dessa substância.

As dimensões da área de retirada de produto são tais que seu volume é cerca de 14516 m³. Esse valor será utilizado na avaliação de consequências internas à instalação.

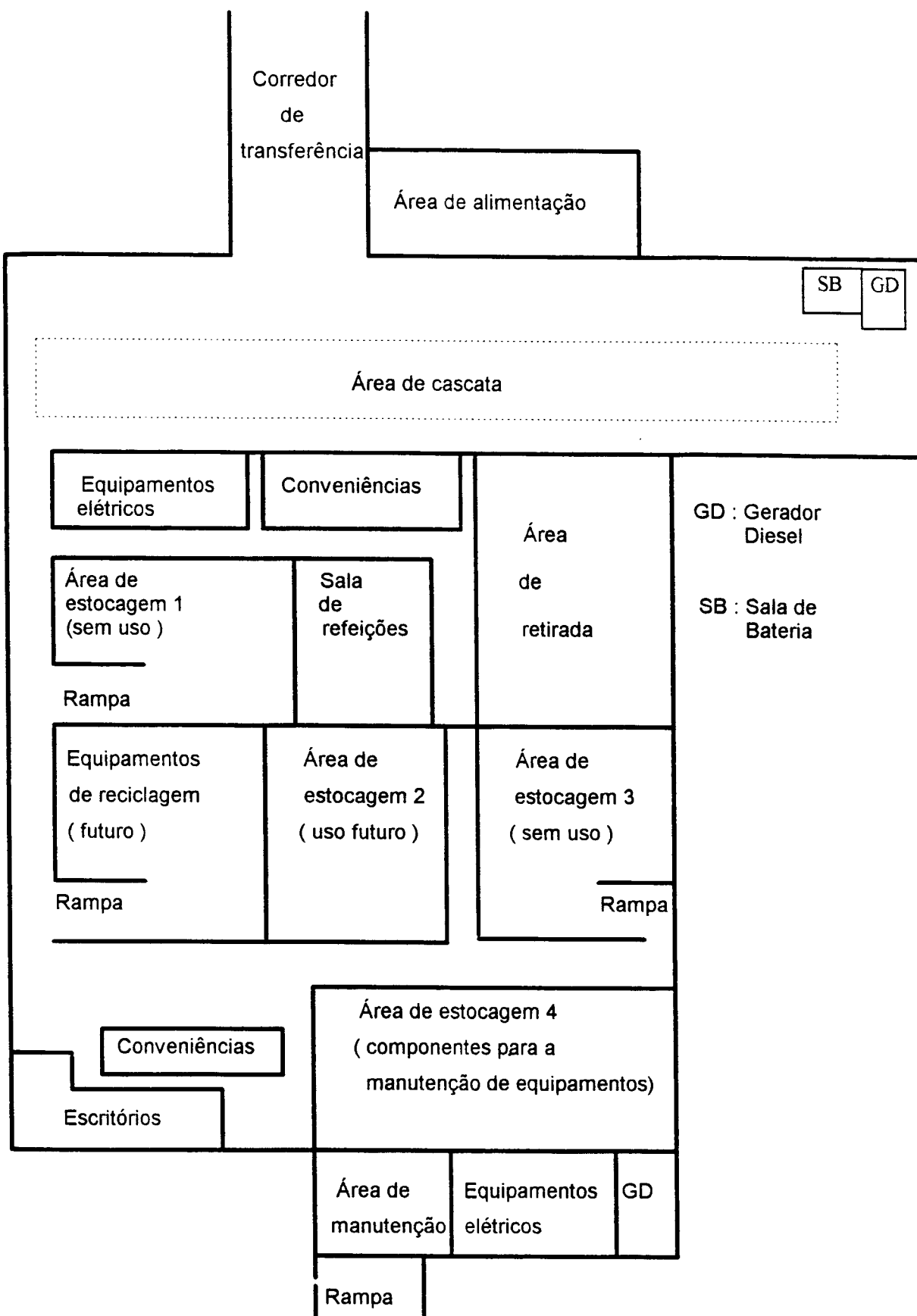


Figura 4.1 : Arranjo físico do primeiro andar da CPDF.

4.2.2 - Manipulação e Estocagem de UF₆

Na CPDF são utilizados os modelos de cilindros 30B e 48Y para a manipulação e estocagem de UF₆.

O cilindro 48Y é usado durante o aquecimento do UF₆ natural na área de alimentação. O cilindro 30B é utilizado para a armazenagem do UF₆ coletado nas áreas de retirada de produto e de rejeito. As características desses cilindros estão resumidas no Anexo I /39/ deste trabalho.

4.2.3 - Processo

A CPDF processa UF₆ natural com a finalidade de produzir urânio enriquecido através da separação isotópica com centrífugas.

A área de processo possui um total de 120 centrífugas arranjadas em vários estágios para se obter o enriquecimento final de 3,2% em U-235. A combinação de estágios é denominada de cascata.

O processo de enriquecimento isotópico de urânio por ultracentrifugação consiste na alimentação do UF₆ gasoso na cascata, na separação dos isótopos nas centrífugas e na retirada do produto enriquecido e do rejeito. As principais características dos sistemas da CPDF que manipulam UF₆ são mostradas na figura 4.2.

4.2.4 - Principais Sistemas da Instalação

A CPDF é composta por vários sistemas, mas apenas serão descritos aqueles que operam com UF₆, pois esse é o composto de interesse numa avaliação de perigos da instalação.

4.2.4.1- Sistema de alimentação

O sistema de alimentação converte o UF₆ sólido natural (0,7% em U-235) em gás através de dois fornos operados com ar quente (o UF₆ é aquecido em cilindros de modelo 48Y).

A alimentação da cascata ocorre de forma contínua: enquanto um cilindro alimenta a cascata, outro já é pré-aquecido para entrar no fluxo de alimentação, sendo que o aquecimento de cada cilindro é feito em área confinada.

Antes do cilindro entrar no sistema de alimentação, a linha entre o cilindro e a válvula V2 (vide figura 4.3) é purgada com ar seco e evacuada. O sistema de evacuação inclui uma armadilha criogênica para condensar o UF_6 e armadilhas químicas para purgar outros gases resultantes da operação desse sistema.

Na ocorrência de um evento indesejável nessa área, não se espera o escape de compostos de urânio ou produtos corrosivos para o meio ambiente, pois os cilindros são mantidos em pressão sub-atmosférica.

A figura 4.3 apresenta um esquema da área de alimentação e a figura 4.4 mostra as etapas do processo de alimentação.

Os principais componentes do sistema de alimentação são os seguintes:

- duas estações de alimentação (com espaço para uma terceira),
- dois fornos de ar quente,
- sistema de recirculação de ar aquecido,
- equipamento para a manipulação dos cilindros,
- sistema de evacuação,
- linha de ar comprimido para purga,
- abastecimento de calor,
- ponte guindaste e
- instrumentação de monitoração e controle de temperatura, pressão e fluxo de UF_6 .

As características deste sistema são:

- capacidade : 2 cilindros 48Y
- fluxo de alimentação : $1,73 \cdot 10^{-3}$ kg /s de UF_6
- pressão do UF_6 no cilindro : $9,3 \cdot 10^4$ Pa (700 torr , sub-atmosférica)
- temperatura do forno: 60 a 66 °C (abaixo da temperatura de liquefação do UF_6)

O sistema é dotado de instrumentação para monitorar e controlar a temperatura, a pressão e o fluxo de UF_6 , para que seja mantida a segurança na alimentação da cascata.

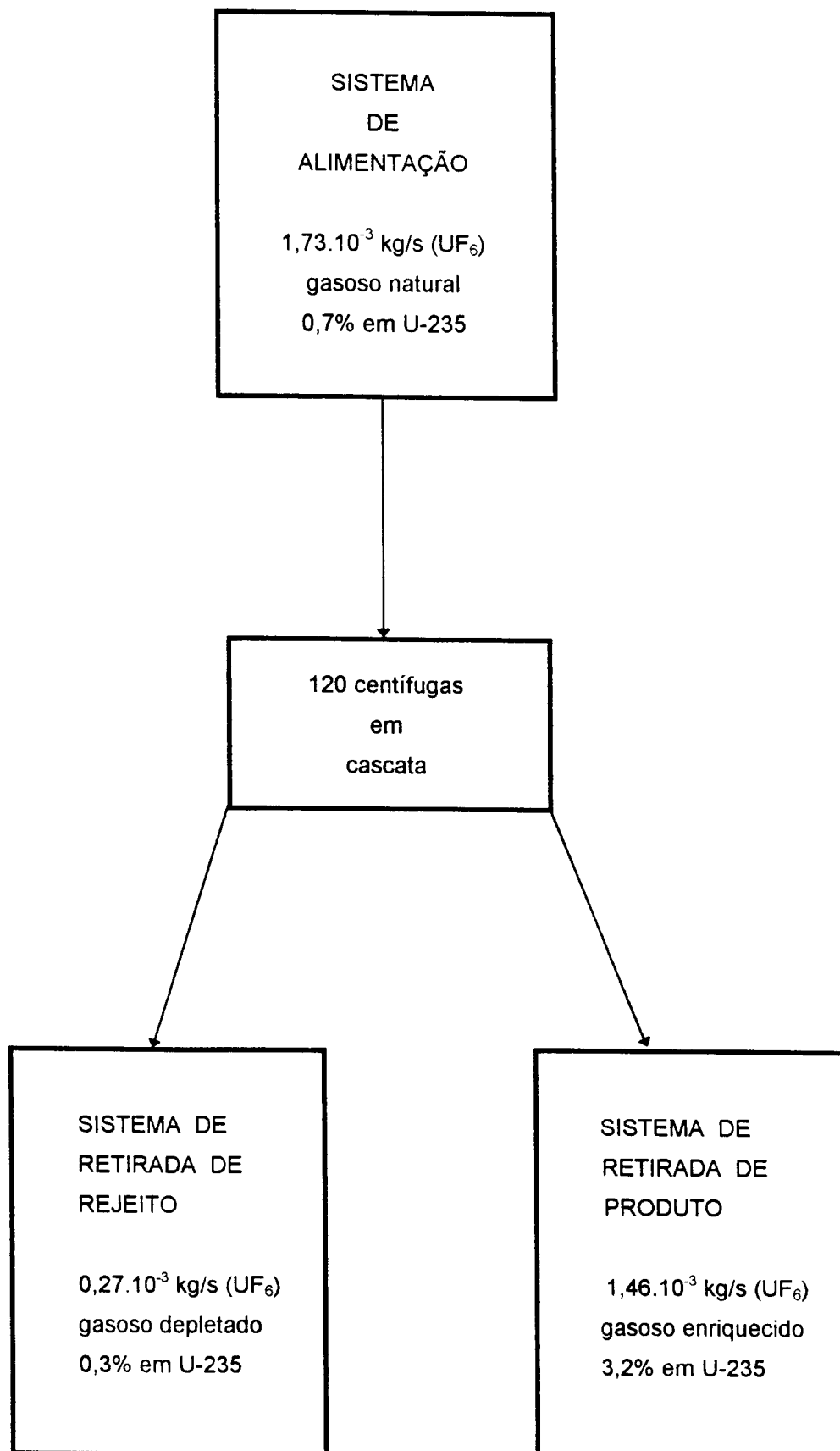
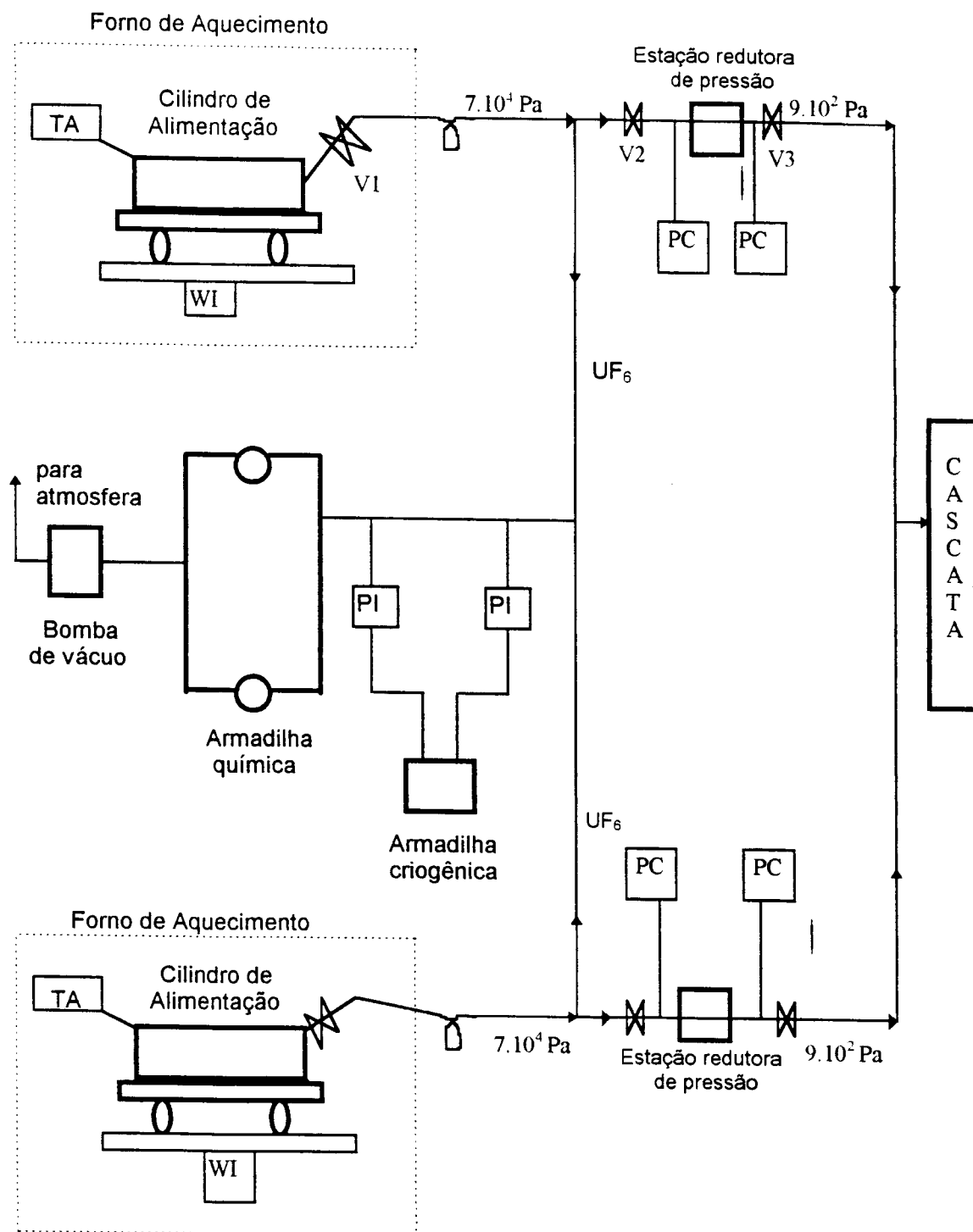


Figura 4.2: Fluxo de massa nas principais áreas da CPDF.



PC: controlador de pressão

PI: indicador de pressão

TA: alarme de temperatura

WI: indicador de peso

Figura 4.3: Fluxograma do sistema de alimentação da CPDF.

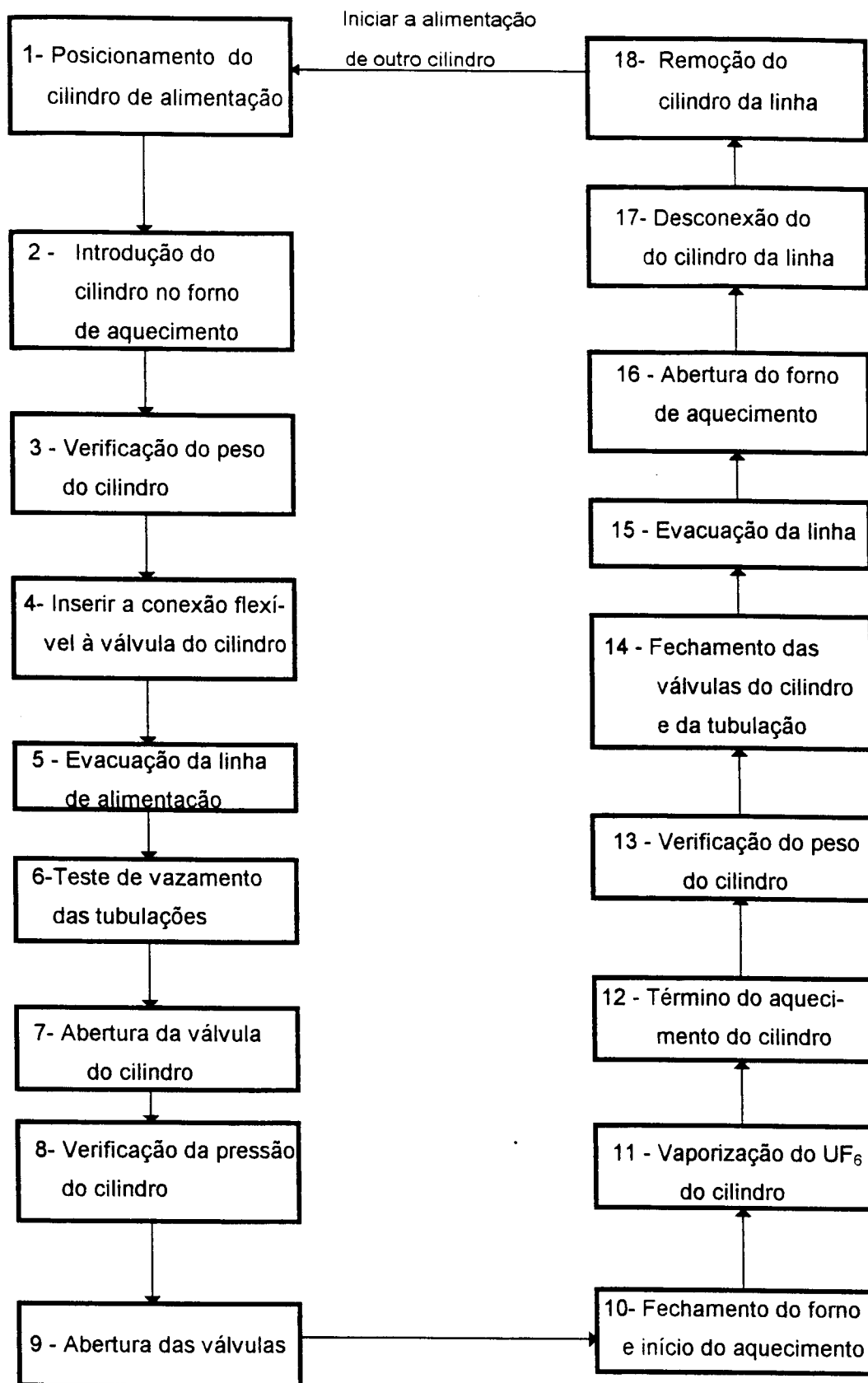


Figura 4.4 : Etapas na operação do sistema de alimentação da CPDF.

4.2.4.2 - Cascata de centrífugas

O grau de enriquecimento final do UF_6 é obtido através da alimentação do produto enriquecido de uma centrífuga para outra com o objetivo de aumentar a concentração em U-235.

As centrífugas possuem altos fatores de separação mas a quantidade de UF_6 processada por unidade é pequena. Portanto, o fluxo desejado na cascata é obtido através de determinado número de máquinas reunidas em paralelo, formando um estágio simples.

A quantidade de centrífugas em um estágio depende das características das máquinas e da capacidade separativa total da cascata. Já o número de estágios necessários, cada um com diferente alimentação, é função do grau de enriquecimento desejado. No caso da CPDF, a cascata possui sete estágios. A figura 4.5 apresenta um esquema dos estágios da cascata de centrífugas.

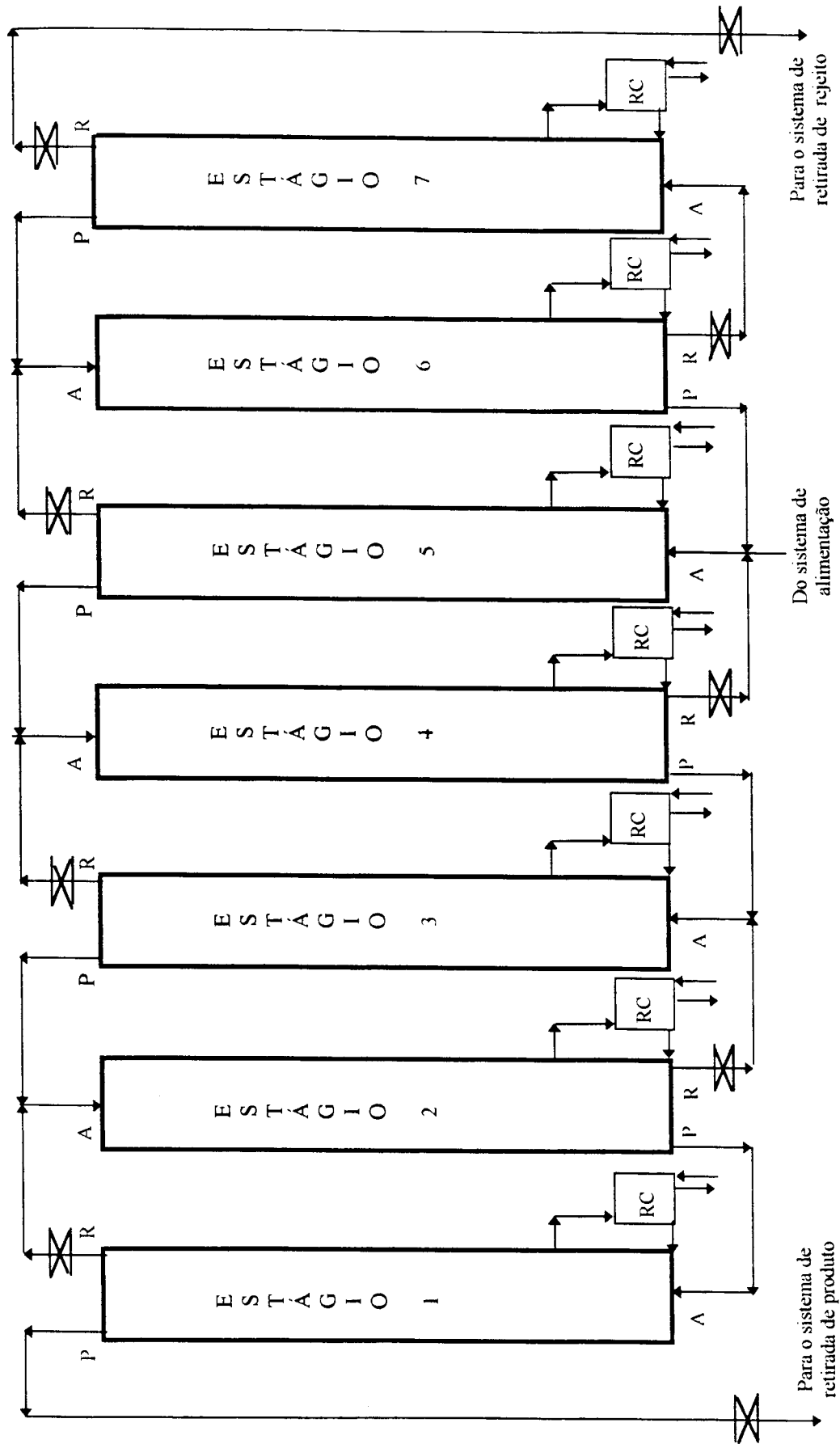
4.2.4.3 - Sistema de retirada de produto

A função deste sistema é coletar o UF_6 enriquecido produzido na cascata.

O sistema possui três estações coletoras, cada uma possuindo um dessublimador primário e um dessublimador secundário. Enquanto uma estação está em operação, as demais podem ser usadas para testes ou como alternativa no redirecionamento do fluxo de UF_6 . As características dos dessublimadores encontram-se na tabela 4.1.

O UF_6 enriquecido a 3,2% em U-235 produzido na cascata flui com a vazão de $0,27 \cdot 10^{-3}$ kg/s e se dirige para o dessublimador primário, o qual é mantido a -73°C . Nessa temperatura, a maior parte do UF_6 fica retido como sólido no próprio dessublimador.

Pequena quantidade de UF_6 gasoso remanescente e gases leves fluem do dessublimador primário para o dessublimador secundário. Este último opera a uma temperatura de -187°C devido ao resfriamento com N_2 e todo o UF_6 é coletado como sólido. Os gases oriundos do dessublimador secundário são tratados com alumina e liberados para a atmosfera.



P: produto; A: alimentação; R: rejeito; RC: resfriamento da cascata de centrífugas

Figura 4.5: Esquema dos estágios da cascata de centrífugas.

Tabela 4.1 : Características dos dessublimadores.

	DS1	DS2
Material	Monel	Monel
Comprimento	4,27 m	2,74 m
Pressão máxima	$10 \cdot 10^5$ Pa	$7 \cdot 10^5$ Pa
Barbatanas	sim	sim
Norma de Projeto	Código ASME	Código ASME
Capacidade	136 kg	136 kg

DS1 : dessublimador primário

DS2 : dessublimador secundário

Quando o dessublimador primário está cheio (ou seja, quando sua carga atinge 136 kg de UF₆ sólido) este é desconectado da cascata. Ele é aquecido a 4°C, através do bombeamento de fluido de troca de calor, para que gases inertes presentes no UF₆ e o HF sejam eliminados. Em seguida, o produto contido no dessublimador primário é aquecido até 82°C e transferido, por gravidade, como UF₆ líquido para cilindros 30B.

O dessublimador primário é aquecido e resfriado pelo bombeamento de fluido térmico contido em três tanques (o fluido passa por jaquetas dos dessublimadores e retorna ao tanque). Um dos tanques de estocagem de fluido é mantido a -101°C e outro a -118°C. O terceiro tanque pode ser usado alternadamente para aquecimento e resfriamento, ou para manter uma temperatura intermediária do refrigerante.

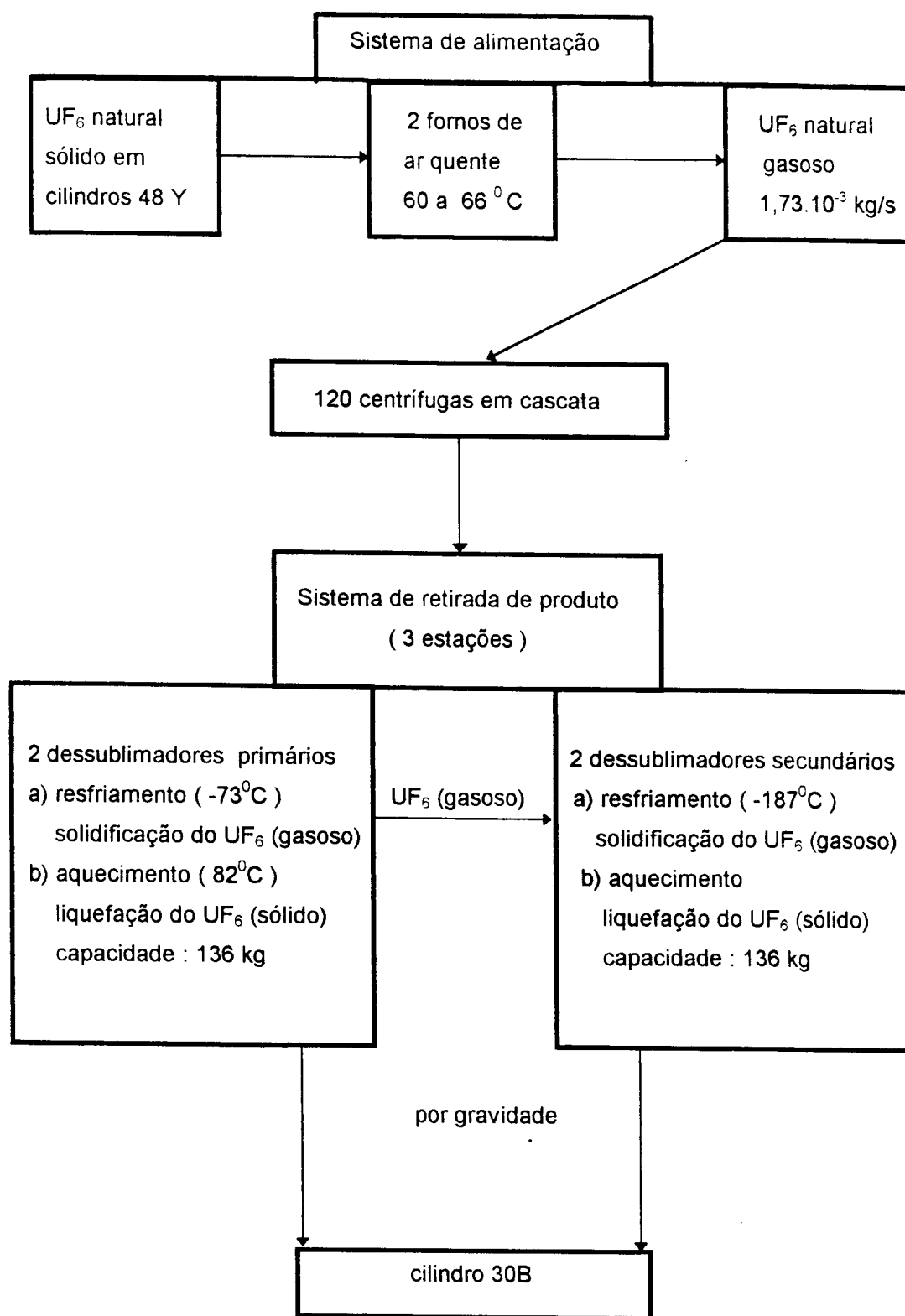
Quando o dessublimador secundário está completo com UF₆ sólido, ou seja, 136 kg de carga, o equipamento é aquecido pela passagem de vapor através das serpentinas que o circundam e o UF₆ liquefeito é transferido para os cilindros da mesma maneira como é feito nos dessublimadores primários.

Baseando-se na capacidade de dessublimação e na vazão de retirada do produto, um dessublimador é aquecido e descarregado num intervalo de $2,7 \cdot 10^5$ s (75h) a $3,6 \cdot 10^5$ s (100 h). O UF₆ líquido oriundo do dessublimador é transferido para o cilindro de armazenamento em cerca de $3,6 \cdot 10^3$ s (1 h).

O sistema de troca térmica dos dessublimadores primários consiste de três tanques confeccionados em aço inoxidável que suportam pressões de $10,3 \cdot 10^5$ Pa. Cada tanque possui 0,9 m de diâmetro e 1,2 m de altura, e o aquecimento é feito por mecanismo externo. Um tanque contém fluido aquecido com vapor a 82°C outro possui fluido resfriado pela unidade de refrigeração até -40°C. Um terceiro tanque contém fluido a uma temperatura intermediária e possui serpentinas internas para aquecimento com vapor. A unidade de refrigeração que opera a 9,67 kJ/s.

O fluido refrigerante utilizado é o Freon 11 MF, podendo ser usados F-114 e tricloroetileno como fluidos alternativos. O sistema é fechado e suporta $10,3 \cdot 10^5$ Pa a 104°C. Cada tanque de estocagem de fluido é protegido de sobre-pressões por válvulas de segurança e discos de ruptura.

A figura 4.6 ilustra as principais etapas do processo de enriquecimento usado na CPDF e a figura 4.7 ilustra o fluxograma da área de retirada de produto.



OBS: O UF_6 depletado oriundo da cascata ($1,46 \cdot 10^{-3}$ kg/s e 0,3% em U-235) tem sequência similar a do sistema de retirada de produto.

Figura 4.6: Esquema do processo de enriquecimento isotópico por ultracentrifugação.

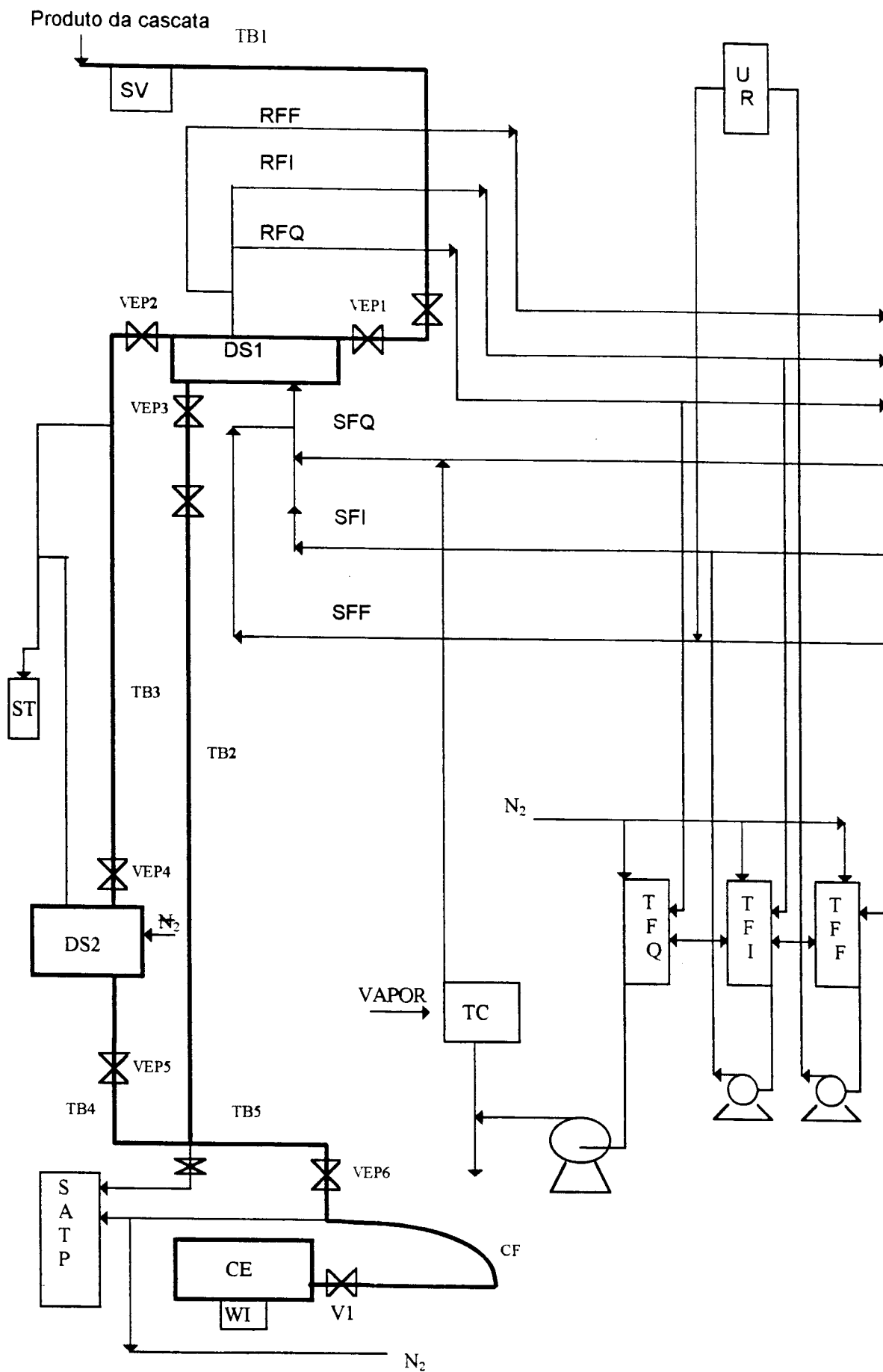


Figura 4.7 : Fluxograma da área de retirada de produto.

LEGENDA DO FLUXOGRAMA DA ÁREA DE RETIRADA DE PRODUTO

SV : sensor de vazão

RFF : retorno de fluido frio

RFI : retorno de fluido intermediário

RFQ : retorno de fluido quente

UR : unidade de refrigeração

DS1 : dessublimador primário

DS2 : dessublimador secundário

SFQ : suprimento de fluido quente

SFI : suprimento de fluido intermediário

SFF : suprimento de fluido frio

ST : sistema de tratamento

TC : trocador de calor

TFQ : tanque de fluido quente

TFI : tanque de fluido intermediário

TFF : tanque de fluido frio

CE : cilindro de estocagem

SATP: sistema de amostragem e testes do produto

WI: indicador de peso

4.2.4.3.1: Etapas para o enchimento do cilindro 30B com UF₆ líquido

A sequência de ações para o enchimento do cilindro 30B com UF₆ líquido é a seguinte:

- 1) Pesagem do cilindro 30B.
- 2) Conexão do cilindro ao sistema de retirada de produto.
- 3) Teste das conexões com aplicação de pressões iguais às de trabalho.
- 4) A escala de peso é zerada.
- 5) Aquecimento da válvula do cilindro para prevenir a solidificação do UF₆.
- 6) Abertura das válvulas VEP6 e V1 (vide figura 4.7), quando as conexões estiverem aquecidas o suficiente.
- 7) Enchimento do cilindro.
- 8) Fechamento das válvulas VEP6 e V1 (vide figura 4.7), quando o conteúdo do cilindro atingir a quantidade desejada.
- 9) Evacuação das tubulações que servem o cilindro.
- 10) Pesagem do cilindro (o cilindro não deve ser movimentado até que o UF₆ em seu interior solidifique totalmente, conforme orientação do manual ORO 651 /39/).

4.2.4.3.2: Comentários a respeito do sistema de retirada de produto

De acordo com a descrição do sistema de retirada de produto, pode ser verificado que:

- 1) Nos locais onde o UF₆ está presente em pressões superiores à atmosférica, estão instalados mecanismos que detectam vazamentos de UF₆.
- 2) A transferência do UF₆ dos dessublimadores para o cilindro de estocagem é conduzida por gravidade.
- 3) Em caso de vazamento do produto, o sistema de ventilação é desligado.
- 4) Não existe bomba sensora de vazão para o controle do fluxo do UF₆ líquido.

5) É possível ocorrer problemas de incrustações de UF_6 sólido, logo as tubulações (de diâmetro $38 \cdot 10^{-3}$ m e confeccionadas em aço inox) devem ser aquecidas.

6) As áreas de retiradas são os únicos locais da instalação onde há UF_6 líquido, e ainda assim por pequenos períodos de tempo (durante o aquecimento e escoamento do dessublimador). O UF_6 é monitorado continuamente, sendo que o cilindro e o edifício podem ser considerados barreiras para o confinamento do UF_6 líquido.

7) Os dessublimadores primários e secundários e o cilindro de estocagem podem ser isolados do sistema de retirada por válvulas instaladas em série (vide figura 4.7). Essas válvulas são do tipo eletro-pneumáticas, de rápido tempo de resposta, já que há a presença de líquido na área.

8) O Freon 11 do sistema de refrigeração é um fluido orgânico que poderia entrar em contato com o UF_6 líquido caso houvesse vazamento no dessublimador. Logo, a segurança na interface entre o dessublimador e as jaquetas por onde passa o fluido de troca térmica deve ser dada por características de projeto e pela manutenção dos equipamentos.

9) O critério utilizado para avaliar-se quando o cilindro de estocagem está cheio é determinado pela condição mais restritiva entre o peso do cilindro (dado por um indicador de peso) e o número de ciclos necessários para completá-lo. Sendo a capacidade do cilindro de 2500 kg e a do dessublimador de 136 kg, são necessários 18 ciclos ($2500/136$) para completar o cilindro de estocagem.

4.2.4.4- Sistema de retirada de rejeito

Esse sistema tem a função de recolher o UF_6 empobrecido proveniente da cascata.

Suas características são similares às da área de retirada de produto, com as seguintes particularidades:

- Vazão: $1,46 \cdot 10^{-3}$ kg/s de UF_6
- Enriquecimento : 0,3% em U-235
- 4 dessublimadores primários
- 4 dessublimadores secundários

4.2.4.5 - Sistema de ventilação e exaustão

A função do sistema de ventilação e exaustão é manter o controle ambiente das áreas de processo da CPDF e permitir a eliminação de gases. No caso da área de cascata, onde se localizam as centrífugas, o controle ambiental é mantido por três unidades de ventilação.

A estrutura e as tubulações do sistema de ventilação e exaustão foram projetadas para suportarem ocorrências naturais severas como abalos sísmicos e tornados.

O projeto inclui meios para evitar o acúmulo de material perigoso, prevenindo a concentração de radioquímicos no interior do edifício, além de filtros HEPA de eficiência na ordem de 85%.

A exaustão da área de cascata e das áreas de retirada de produto e de rejeito é realizada por ventiladores localizados no teto do edifício, sendo que existem mecanismos que impedem o contra-fluxo nas linhas. Em caso de acidente, a única ação necessária para se paralizar o sistema de ventilação e exaustão é o desligamento dos ventiladores.

Durante a operação normal da instalação, não são esperados vazamentos de UF_6 , mas existem detectores de fumaça nas áreas de processo que alertam os operadores da planta caso ocorra alguma evento indesejável. Os controles das unidades de remoção de fumaça e o sistema de proteção contra fogo são localizados fora das respectivas áreas a fim de serem acessíveis ao pessoal de combate ao incêndio.

As áreas de processo, como a área de cascata e as áreas de retirada de produto e de rejeito, são servidas, individualmente, por sistemas de ventilação e exaustão independentes. Os ventiladores de exaustão dessas áreas são operados através de controle remoto. Os circuitos de controle desses ventiladores estão interligados em um painel de controle central, que permite a parada ou o acionamento desses equipamentos da sala de controle da CPDF.

No caso de um vazamento acidental de UF_6 no interior da CPDF, mecanismos da sala de controle acusariam uma pressão positiva extra e o sistema de ventilação e exaustão é imediatamente desligado.

4.2.4.6 - Efluentes gasosos

Os efluentes gasosos exauridos do sistema de tratamento de gases da CPDF são constituídos exclusivamente por gases inertes, ar de purga e nitrogênio.

O nível de radioatividade liberada para a atmosfera, juntamente com os efluentes gasosos, é praticamente zero pois o inventário de urânio no ar ambiente é pequeno e as eficiências dos filtros e das armadilhas químicas e criogênicas são muito elevadas. Logo, em condições operacionais normais, não se espera a liberação de UF_6 para a atmosfera.

4.2.4.7 - Resíduos não radiológicos

Em condições normais de operação, os únicos resíduos não radiológicos gerados em atividades na CPDF são: vapor condensado, água de resfriamento, esgoto doméstico e refugo não contaminado.

O refugo sólido não contaminado e não perigoso é depositado num aterro sanitário localizado a 3200 m da planta.

O tricloroetileno (utilizado como meio de troca térmica nos dessublimadores criogênicos e no sistema de vácuo das estações de retirada) é classificado como potencialmente perigoso, em termos químicos, quando inalado acidentalmente. Assim, este líquido é confinado dentro de containers fechados.

4.3 - Análise Histórica de Acidentes em Instalações Similares

São descritos nesta seção eventos ocorridos em instalações de enriquecimento isotópico. A análise histórica é um instrumento útil na identificação dos perigos potenciais da CPDF. Convém destacar que não há conhecimento, até o momento, de eventos causados pela operação dessas usinas com consequências sérias para os trabalhadores, indivíduos do público ou meio ambiente /10/, /40/, /41/.

Não estão incluídos nessa análise eventos ocorridos em outras instalações do ciclo do combustível nuclear, como o acidente na "Usina de Hexafluoreto de Urânio de Seguoyah de Kerr-McGee", Oklahoma, EUA, em 04/01/86.

4.3.1 - Usina de Separação Isotópica de Tricastin

- a) Localização : Tricastin, França.
- b) Método de Enriquecimento : difusão gasosa
- c) Descrição dos Eventos:

Evento c1:

- Data: 13/01/81
- Causa: explosão no compartimento anexo à usina, onde o UF₆ era purificado.
- Consequência: destruição de uma tubulação no local do evento.
- Quantidade liberada: não se determinou a quantidade total de UF₆ liberada, mas não foram constatadas contaminações químicas ou radiológicas externas ao prédio.
- Resultado: não houve contaminação dos operadores e a usina continuou operando.

Evento c2:

- Data: 04/03/81
- Causa: defeito nas válvulas de isolamento dos dessublimadores.
- Consequência: vazamento de UF₆ na área de retirada de produto.
- Quantidade liberada: não se sabe a quantidade total de UF₆ liberada, mas não foram constatadas contaminações químicas ou radiológicas externas ao prédio.
- Resultado: não houve contaminação dos operadores e a usina continuou operando.

Evento c3:

- Data: 10/09/85
- Causa: defeito no selo de uma válvula na entrada de um dessublimador.
- Consequência: vazamento de UF₆ pela válvula defeituosa.
- Quantidade liberada: vazamento de 400 kg de UF₆ na instalação. Por uma abertura na parte superior do edifício, 10 kg de urânio foram liberados para a atmosfera.
- Resultado: 13 trabalhadores inalaram urânio mas em apenas um deles foi excedido o limite de $2,5 \cdot 10^{-6}$ kg em um dia, sem danos irreversíveis à saúde.

4.3.2 - Planta de Difusão Gasosa de Portsmouth

- a) Localização : Portsmouth, EUA

b) Método de Enriquecimento : difusão gasosa

c) Descrição dos Eventos :

Evento c1:

- Data : 1973
- Causa : como resultado de uma vibração normal da planta, uma tubulação de processo por onde fluía UF₆ líquido e uma tubulação de controle de válvulas por onde fluía óleo sofreram abrasão. Formaram-se pequenos orifícios em ambas as tubulações e o UF₆ foi entrando em contato com o óleo durante certo tempo.
- Consequência: o UF₆ foi reagindo com o óleo, formando um composto sólido.
- Quantidade liberada: foram recuperados 11 kg de U-235 presentes no composto sólido formado.
- Resultado: o trecho afetado foi paralizado e tratado com cádmio.

Evento c2:

- Data : 1978
- Causa : queda de um cilindro 48Y de uma plataforma móvel quando o mesmo era removido para amostragem em pátio a céu aberto.
- Consequência: o impacto resultou em uma rachadura de 0,2 m de comprimento na parede do cilindro, ocasionando vazamento de UF₆.
- Quantidade liberada: não determinada.
- Resultado: não houve consequências significativas para esse evento.

Evento c3:

- Data : 16/06/90
- Causa : choque entre cilindros 48Y usados para a estocagem do produto em pátio a céu aberto. Os cilindros estavam estocados desde 1977.
- Consequência: vazamento de UF₆ pela área danificada do cilindro.
- Quantidade liberada: 13 kg de UF₆. Quantidades desprezíveis do HF formado na hidrólise do UF₆ foram liberadas para a atmosfera.
- Resultado: não houve consequências significativas para esse evento.

Evento c4:

- Data : 04/07/91
- Causa : erro operacional na conexão de "pigtail" em autoclave.
- Consequência: escape de pequena quantidade de UF₆.

- Quantidade liberada: não determinada.
- Resultado: não houve consequências significativas para esse evento.

Evento c5:

- Data : 15/11/91
- Causa : erro operacional na conexão de "pigtail" em cilindro de UF₆.
- Consequência: escape de pequena quantidade de UF₆.
- Quantidade liberada: não determinada.
- Resultado: não houve consequências significativas para esse evento.

4.3.3 - Planta de Difusão Gasosa de Paducah

a) Localização : Paducah, EUA

b) Método de Enriquecimento : difusão gasosa

c) Descrição dos Eventos :

Evento c1:

- Data : 17/02/94
- Causa : erro operacional na remoção de um cilindro de UF₆ (com capacidade de 10000 kg) quando o mesmo ainda estava conectado à tubulação.
- Consequência: ruptura da tubulação conectada ao cilindro.
- Quantidade liberada: desconhecida.
- Resultado: paralização da instalação.

Evento c2:

- Data : 12/04/94
- Causa : erro operacional durante a conexão de um cilindro de UF₆ da estação de retirada.
- Consequência: escape de UF₆ no interior da caixa de Plexiglass que enclausura a região onde ocorre a conexão do cilindro.
- Quantidade liberada: o operador foi contaminado internamente por $5 \cdot 10^{-7}$ kg de urânio por litro.
- Resultado: a linha entre a válvula de isolamento da linha de UF₆ e a válvula de isolamento do cilindro foi purgada.

4.3.4 - Planta de Centrifugação E22 de Capenhurst

a) Localização : Capenhurst, Inglaterra

b) Método de Enriquecimento : ultracentrifugação

c) Descrição dos Eventos :

Evento c1:

- Data : 24/08/84
- Causa: procedimento inadequado na troca de uma bomba de alta pressão.
- Consequência: liberação de fumos de UF₆.
- Quantidade liberada: desconhecida.
- Resultado: foram realizados exames de urina em 21 operadores e os resultados indicaram incorporação desprezível de urânio.

Evento c2:

- Data: 04/04/86
- Causa: desgaste do selo de uma bomba.
- Consequência: liberação de fumos de UF₆.
- Quantidade liberada: desconhecida.
- Resultado: foram realizados exames de urina em 9 operadores e os resultados indicaram incorporação desprezível de urânio.

Evento c3:

- Data : 09/05/86
- Causa : procedimento inadequado durante a manutenção de uma bomba.
- Consequência: liberação de fumos de UF₆.
- Quantidade liberada: desconhecida.
- Resultado: foram realizados exames de urina em 5 operadores e os resultados indicaram incorporação desprezível de urânio.

Evento c4:

- Data : 15/05/86
- Causa: procedimento inadequado durante a desconexão de uma haste de uma bomba de alta pressão em atividades associadas à manutenção dessa bomba.
- Consequência: liberação de fumos de UF₆.

- Quantidade liberada: desconhecida.
- Resultado: foram realizados exames de urina em 2 operadores e os resultados indicaram incorporação desprezível de urânio.

Evento c5:

- Data : 22/05/87
- Causa: adoção de procedimentos inadequados na tentativa de desobstruir uma tubulação de amostragem que estava bloqueada com resíduos de urânio e UF₆.
- Consequência: liberação de fumos de UF₆.
- Quantidade liberada: desconhecida.
- Resultado: foram realizados exames de urina em 4 operadores e os resultados indicaram incorporação desprezível de urânio.

Evento c6:

- Data : 10/10/87
- Causa: presença indevida de UF₆ em conexão flexível que conectava uma bomba à planta.
- Consequência: liberação de fumos de UF₆ quando a bomba foi desconectada da planta, que se encerrou com a recolocação da conexão flexível. Na noite seguinte ocorreu liberação adicional pois um operador desconectou a conexão flexível.
- Quantidade liberada: desconhecida.
- Resultado: foram realizados exames de urina em 8 operadores e os resultados indicaram incorporação desprezível de urânio.

Evento c7:

- Data : 22/11/87
- Causa : vazamento de óleo pelo selo defeituoso de uma bomba.
- Consequência: reação do UF₆ com o óleo e liberação de fumos de UF₆.
- Quantidade liberada: desconhecida.
- Resultado: foram realizados exames de urina em 10 operadores e os resultados indicaram incorporação desprezível de urânio.

Evento c8:

- Data : 22/11/87
- Causa: uso inadequado de embalagem plástica para envolver tubulação de amostragem de líquido.
- Consequência: liberação de fumos de UF₆ pela tubulação e pela embalagem plástica.

- Quantidade liberada: desconhecida.
- Resultado: foram realizados exames de urina em 10 operadores e os resultados indicaram incorporação desprezível de urânio.

Evento c9:

- Data : 28/11/87
- Causa: desgaste do selo de uma bomba de alta pressão do sistema de alimentação.
- Consequência: liberação de fumos de UF₆.
- Quantidade liberada: desconhecida.
- Resultado: foram realizados exames de urina em 19 operadores e os resultados indicaram incorporação desprezível de urânio.

Evento c10:

- Data : 12/02/88
- Causa: desgaste do selo de uma bomba de alta pressão do sistema de alimentação.
- Consequência: liberação de fumos de UF₆.
- Quantidade liberada: desconhecida.
- Resultado: foram realizados exames de urina em 18 operadores e os resultados indicaram incorporação desprezível de urânio.

Evento c11:

- Data : 02/10/88
- Causa : ruptura no equipamento de amostragem de produto líquido.
- Consequência: liberação de fumos de UF₆.
- Quantidade liberada: desconhecida.
- Resultado: foram realizados exames de urina em 3 operadores e os resultados indicaram incorporação desprezível de urânio.

Evento c13:

- Data : 30/03/89
- Causa: quebra da conexão flexível que conecta o cilindro de alimentação à planta.
- Consequência: pequena perda de urânio durante a operação de retirada do cilindro.
- Quantidade liberada: desconhecida.
- Resultado: nenhum.

Evento c14:

- Data: 22/11/89

- Causa: procedimentos inadequados na desobstrução de uma válvula causaram sublimação localizada de UF_6 e pequeno aumento de pressão no interior da válvula.
- Consequência: liberação de fumos de UF_6 pelo selo da válvula.
- Quantidade liberada: desconhecida.
- Resultado: foram realizados exames de urina nos operadores envolvidos e os resultados indicaram incorporação desprezível de urânio.

4.3.5 - Planta de Difusão Gasosa de Oak Ridge

a) Localização : Tennessee, EUA

b) Método de Enriquecimento : difusão gasosa

c) Descrição dos Eventos :

Evento c1:

- Data : 1975
- Causa: introdução de óleo em cilindro 30B de estocagem de UF_6 através de bomba defeituosa.
- Consequência: o UF_6 reagiu com o óleo, causando um excesso de pressão no cilindro de cerca de $8,3 \cdot 10^6$ Pa .
- Energia liberada na reação: cerca de 975 J.
- Resultado: paralização do trecho e remoção do cilindro.

Evento c2:

- Data : 1981
- Causa: sobre-aquecimento em um compressor, ocasionando aumento de pressão nas tubulações de UF_6 e falha nas mesmas.
- Consequência: entrada de UF_6 no compressor e reação do UF_6 com a parede metálica do compressor, formando um composto sólido.
- Quantidade formada: foram formados cerca de 113 kg de composto sólido de urânio.
- Resultado: remoção do compressor e tratamento do mesmo com cádmio.

4.3.6 - Planta de Ultracentrifugação de Nederland

a) Localização: Nederland, NV.

b) Método de Enriquecimento: ultracentrifugação

c) Descrição dos Eventos:

Evento c1:

- Causa: presença de depósitos em uma autoclave, aumentando sua pressão interna.
- Consequência: vazamento de UF_6 dentro da autoclave.
- Quantidade liberada: cerca de 2 kg de urânio dentro da autoclave.
- Resultado: foram recolhidas amostras de ar e de urina de operadores para análise mas os resultados não indicaram quantidades detectáveis.

Evento c2:

- Causa: procedimento incorreto na purga de tubulações de UF_6 com N_2 , causando a quebra de uma junta.
- Consequência: liberação de N_2 e de um pó contendo U-238.
- Quantidade liberada: desconhecida.
- Resultado: foram coletadas amostras de urina de 2 operadores mas não se detectou incorporação de urânio.

4.3.7 - Instalações de Enriquecimento da Urenco

a) Localização: a Urenco-Organization opera plantas na Inglaterra (Capenhurst), Alemanha (Gronau) e Holanda (Almelo).

b) Método de Enriquecimento: ultracentrifugação

c) Descrição dos Eventos:

Evento c1:

- Causa: abertura errada de um dessublimador primário.
- Consequência: vazamento de UF_6 .
- Quantidade liberada: liberação na ordem de centenas de gramas de UF_6 .
- Resultado: o evento não resultou em danos à saúde dos trabalhadores.

Evento c2:

- Falha : quebra da válvula superior do cilindro de UF_6 .

- Consequência: liberação de UF₆ dentro do edifício, sendo que dois operadores inalaram pequena quantidade desse produto.
- Quantidade liberada: liberação na ordem de 0,01 kg de UF₆.
- Resultado: o evento não resultou em danos à saúde dos trabalhadores.

4.4 - Aplicação do Método de Avaliação de Perigos

4.4.1 - Divisão da planta em áreas, identificação dos componentes, modos de falhas e inventário de materiais

De acordo com o método proposto, a CPDF foi dividida em unidades funcionais, destacando-se as áreas principais: alimentação, cascata, retirada de produto e retirada de rejeito. Para uma das áreas, foram identificadas as quantidades e as condições operacionais do UF₆, os componentes presentes e bem como seus possíveis modos de falha.

I - Área de alimentação

1. Função: converter o UF₆ sólido natural em gás.
2. Capacidade: 2 cilindros 48Y.
3. Modo de aquecimento do UF₆: através de 2 fornos que operam com ar quente.
4. Temperatura do forno: 60 a 66 °C (não ocorre liquefação do UF₆).
5. Pressão do UF₆ no cilindro: $9,3 \cdot 10^4$ Pa (700 torr).
6. Condição operacional do UF₆: sólido e gás sub-pressurizado.
7. Componentes de interesse:
 - cilindros 48Y
 - tubulações
 - conexões flexíveis
 - válvulas do cilindro e das tubulações

8. Fluxo de UF_6 : $1,73 \cdot 10^{-3}$ kg/s
9. Enriquecimento do UF_6 de alimentação: natural (0,7 % em U-235)
10. Falhas na área:
 - defeitos de fabricação dos cilindros
 - ruptura total na tubulação de UF_6
 - ruptura completa da conexão flexível
 - quebra das válvulas do cilindro e das tubulações

II - Área de cascata

1. Função: enriquecer o UF_6 gasoso natural.
2. Condição operacional do UF_6 : gasoso sub-pressurizado (da ordem de 900 Pa).
3. Quantidade de máquinas: 120.
4. Quantidade de UF_6 : cerca de 0,5 kg em toda a cascata.
5. Componentes de interesse:
 - ultracentrífugas
 - tubulações
 - válvulas de isolamento
6. Falhas na área:
 - quebra do rotor da ultracentrífuga
 - vazamento ou quebra nas tubulações da cascata
 - defeitos nas válvulas de isolamento

III - Área de retirada de produto

1. Função: recolher o UF_6 enriquecido proveniente da cascata.
2. Condição operacional do UF_6 : sólido, gás sub-pressurizado e líquido pressurizado.

3. Enriquecimento do UF₆: 3,2% em U-235.
4. Fluxo do UF₆: $2,7 \cdot 10^{-4}$ kg/s.
5. Estações coletoras: três estações coletoras, cada uma com dois dessublimadores: o primário (-73°C) e o secundário (-187°C).
6. Quantidades de UF₆ em uma estação coletora:
 - em condições de transferência: 136 kg de UF₆ líquido.
 - em cada dessublimador: 136 kg de UF₆, inicialmente no estado sólido e, após o aquecimento (82 °C), no estado líquido.
 - no cilindro 30B: 2277 kg de UF₆.
7. Componentes de interesse:
 - dessublimadores
 - cilindro 30B de transporte
 - tubulação de UF₆
 - conexões flexíveis
8. Falhas na área:
 - abertura errada do dessublimador ou defeito no dessublimador
 - quebra na válvula do cilindro 30B
 - ruptura na tubulação ou na conexão flexível que transporta o UF₆ no processo de transferência do líquido para o cilindro de transporte 30B

IV - Área de retirada de rejeito

1. Função: recolher o UF₆ empobrecido proveniente da cascata.
2. Condição operacional do UF₆: sólido, gás sub-pressurizado e líquido pressurizado.
3. Enriquecimento do UF₆: 0,3% em U-235.
4. Fluxo de UF₆: $1,46 \cdot 10^{-3}$ kg/s.

As características dess área são similares às da área de retirada de produto, sendo os cilindros de transporte do tipo 48 Y e operando com 4 estações coletoras.

4.4.2 - Identificação preliminar dos eventos indesejáveis nas áreas da CPDF

4.4.2.1 - Introdução

A partir das informações do relatório K/T S 11.872 /38/, foram selecionados eventos indesejáveis no processamento de UF₆ nas principais áreas da CPDF.

Vale ressaltar que os máximos inventários de UF₆ no interior da CPDF se encontram na área de alimentação, na área de cascata e nos cilindros e dessublimadores das áreas de retirada de produto e de rejeito.

4.4.2.2 - Eventos indesejáveis

A identificação preliminar dos eventos indesejáveis nas principais áreas da CPDF resultou nas situações descritas a seguir:

A - Área de alimentação

Através da análise do fluxograma apresentado na figura 4.3, foi possível selecionar os seguintes eventos indesejáveis na área de alimentação:

I - Eventos indesejáveis que não levariam a vazamentos de UF₆

Evento A1: Pressão excessiva no cilindro de alimentação à temperatura ambiente

Causa: preparação do UF₆ fora das especificações.

Consequência: excesso de impurezas no interior do cilindro.

Método de detecção: verificação da pressão do cilindro durante a fase de preparação para a alimentação da cascata.

Ação corretiva: o cilindro deve ser retirado da linha de alimentação e enviado para a remoção das impurezas, seguindo as orientações do manual ORO 651 /39/.

Evento A2: Pressão excessiva no cilindro de alimentação durante operação

Causa: sobre-aquecimento do cilindro.

Consequência: impacto na operação da planta.

Método de detecção: alarme de alta pressão no sistema de alimentação.

Ação corretiva: diminuição da temperatura dos aquecedores a ar.

II - Eventos indesejáveis que levariam a vazamentos de UF₆

Evento A3: Defeito no cilindro de alimentação

Causa: falha estrutural no cilindro.

Consequência: vazamento de UF₆ gasoso pelo corpo do cilindro durante aquecimento.

Método de detecção: observação visual e atuação de detector de fumaça.

Ação corretiva: controlar o vazamento do cilindro defeituoso, retirá-lo da área de alimentação, descontaminar a área e alimentar a cascata com cilindro alternativo.

Evento A4: Quebra da válvula do cilindro.

Causa: esforços indevidos na válvula durante a operação de conexão do cilindro.

Consequência: possível vazamento de pequena quantidade de UF₆.

Método de detecção: observação visual e atuação de detector de fumaça.

Ação corretiva: eliminar o vazamento da válvula defeituosa, retirar o cilindro da área de alimentação, descontaminar a área e alimentar a cascata com cilindro alternativo.

Evento A5: Rompimento da conexão flexível do cilindro de alimentação

Causa: falha mecânica.

Consequência: vazamento de UF₆.

Método de detecção: observação visual e atuação de detector de fumaça.

Ação corretiva: estancar o vazamento, paralisar a área para descontaminação e substituir a conexão flexível.

B - Área da cascata

O esquema dos estágios da cascata de centrífugas apresentado na figura 4.5 indica os seguintes eventos indesejáveis na área de cascata:

I - Eventos indesejáveis que não levariam a vazamentos de UF₆

Evento B1: Perda de água de resfriamento das centrífugas.

Causa: falha no sistema que fornece a água das centrífugas.

Consequência: possível sobre-aquecimento das máquinas.

Método de detecção: sensores de temperatura das centrífugas.

Ação corretiva: paralização da cascata para reparos.

Evento B2: Perda do controle das centrífugas

Causa: queda de energia elétrica ou falhas no sistema de controle.

Consequência: variação no fluxo de UF₆.

Método de detecção: atuação da instrumentação da cascata.

Ação corretiva: a máquina (ou a planta) deve ser paralizada e isolada para reparos na rede elétrica ou sistema de controle.

Evento B3: Quebra do rotor da centrífuga

Causa: falha mecânica ou elétrica no rotor da centrífuga.

Consequência: variação no fluxo de UF₆.

Método de detecção: atuação da instrumentação da cascata.

Ação corretiva: a máquina deve ser paralizada e isolada para reparos ou substituição.

II - Eventos indesejáveis que levariam a vazamentos de UF₆

Evento B4: Rompimento de tubulação da cascata

Causa: choque mecânico com a tubulação da cascata.

Consequência: possível vazamento de UF₆ contido nas tubulações.

Métodos de detecção: variação da pressão das tubulações.

Ação corretiva: paralização do trecho (ou planta) para reparos.

Evento B5: Falha em válvula de isolamento

Causa: defeito na válvula de isolamento.

Consequência: possível vazamento de UF₆ pela válvula defeituosa.

Métodos de detecção: variação da pressão das tubulações.

Ação corretiva: paralização do trecho afetado (ou planta) para reparos ou substituições.

C - Áreas de retirada (de produto e de rejeito)

O fluxograma apresentado na figura 4.7 permite a identificação preliminar dos seguintes eventos indesejáveis nas áreas de retirada de produto e de rejeito:

I - Eventos indesejáveis que não levariam a vazamentos de UF₆

Evento C1: Entupimento de válvulas das tubulações de transferência de UF₆

Causa: solidificação do UF₆ no corpo da válvula.

Consequência: sobre-pressão no trecho da tubulação afetada.

Método de detecção: atuação do indicador de pressão.

Ação corretiva: a tubulação afetada deve ser isolada e a válvula deve ser removida para desentupimento, ou a válvula deve ser aquecida.

Evento C2: Excesso de carga nos dessublimadores

Causa: erro operacional

Consequência: possível rompimento do dessublimador durante o seu aquecimento.

Método de detecção: verificação do peso do dessublimador.

Ação corretiva: diminuição da carga de UF₆ por transferência a vácuo.

Evento C3: Sobre-enchimento do cilindro 30B de armazenamento.

Causa: erro operacional.

Consequência: possível ruptura do cilindro quando o mesmo for aquecido, caso não sejam obedecidos os procedimentos de rotina.

Método de detecção: atuação do indicador de peso instalado no berço do cilindro.

Ação corretiva: diminuição da carga de UF₆ por transferência a vácuo.

Evento C4: Perda de refrigeração na área de retirada

Causa: quebra da serpentina do sistema de refrigeração.

Consequência: aquecimento inadequado dos dessublimadores.

Métodos de detecção: sensores de temperatura dos dessublimadores.

Ação corretiva: reparos no sistema de refrigeração.

Evento C5: Quebra nas bombas de recirculação de refrigerante

Causa: falha nas bombas de refrigeração.

Consequência: perda de refrigerante no sistema de retirada.

Métodos de detecção: atuação de detectores de fluxo de refrigerante.

Ação corretiva: paralização da área para se efetuarem reparos.

II - Eventos indesejáveis que levariam a vazamentos de UF₆**Evento C6: Rompimento de tubulação que transporta UF₆ líquido**

Causa: falha mecânica.

Consequência: vazamento de UF₆.

Método de detecção: observação visual do evento devido à formação de "nuvem" branca e atuação de detectores de fumaça.

Ação corretiva: controlar o vazamento, paralisar a área para descontaminação e substituir a tubulação.

Evento C7: Falha em válvula eletropneumática

Causa: fadiga, tensões, defeitos de fabricação e incrustações de UF₆.

Consequência: possível vazamento de UF₆.

Método de detecção: atuação da instrumentação da válvula e detectores de fumaça.

Ações corretivas: controlar o vazamento e substituir a válvula defeituosa.

Evento C8: Falha nos dessublimadores primário ou secundário.

Causa: corrosão do equipamento ou defeito mecânico.

Efeito: possível vazamento de UF₆.

Método de detecção: sensores de pressão.

Ações corretivas: redirecionamento do fluxo de UF₆ para outra estação coletora.

Evento C9: Falha da conexão flexível do cilindro 30B durante a transferência líquida

Causa: movimento da plataforma sobre a qual o cilindro 30B se apóia.

Efeito: vazamento de UF₆ pela conexão.

Método de detecção: observação visual do evento devido à formação de "nuvem" branca e atuação de detectores de fumaça.

Ação corretiva: controlar o vazamento e substituir a conexão flexível do cilindro.

Evento C10: Quebra da válvula do cilindro de armazenamento

Causa: choque mecânico com a válvula do cilindro durante a transferência líquida.

Efeito: contaminação local com UF₆.

Método de detecção: observação visual do evento devido à formação de "nuvem" branca e atuação de detectores de fumaça.

Ação corretiva: controlar o vazamento, paralizar a área para descontaminação e providenciar os reparos necessários.

4.4.2.3 - Conclusão

Como resultado da avaliação das principais áreas da CPDF, é possível determinar as quantidades máximas de UF₆ presentes em cada uma das áreas:

- área de alimentação: 25000 kg de UF₆, sendo que a maior parte encontra-se no estado sólido e o restante é gás sub-pressurizado,
- área de cascata: 0,5 kg de UF₆ gasoso sub-pressurizado,
- áreas de retirada de produto e de rejeito: 272 kg de UF₆ líquido (assumindo-se as cargas nos dessublimadores primário e secundário da estação coletora operante)

O maior perigo que a instalação oferece aos operadores, indivíduos do público e meio ambiente corresponde à liberação de UF₆ dos sistemas de retirada de

produto e de rejeito, pois o inventário de UF₆ nos dessublimadores, durante a operação de transferência, encontra-se no estado líquido. Se houver vazamento nesses equipamentos, ocorrerá a reação do UF₆ líquido com a umidade do ar, resultando em UO₂F₂ e HF (esse último é responsável por sérios danos à saúde humana).

Os vazamentos mais relevantes de UF₆ possíveis de ocorrer na CPDF correspondem à falhas na área de retirada de produto, com o escape de até 136 kg de UF₆ líquido e com potencial de liberação para o meio ambiente. As consequências desse evento estão descritas na secção 4.4.7.

4.4.3 - Análise de Modos de Falhas e Efeitos da Área de Retirada de Produto

4.4.3.1 - Introdução

Como a área de retirada de produto é a que oferece maior perigo potencial, pois opera com a maior quantidade de UF₆ no estado líquido, será feita uma AMFE dessa área visando refinar a análise do item anterior, identificando qualitativamente os seus pontos críticos e classificando os eventos de acordo com a sua gravidade para a planta e meio ambiente.

Os itens analisados são codificados, conforme mostrado na tabela 4.2, através de siglas mneumônicas, a fim de tornar a planilha da AMFE mais concisa. A figura 4.8 apresenta um esquema parcial da área de retirada de produto, enfatizando os itens de interesse na avaliação de perigos.

Tabela 4.2 - Siglas mneumônicas utilizadas na codificação de eventos

ITEM	CÓDIGO
Válvula eletro- pneumática	VEP
Tubulação	TB
Dessublimador primário	DS1
Dessublimador secundário	DS2
Conexão flexível	CF

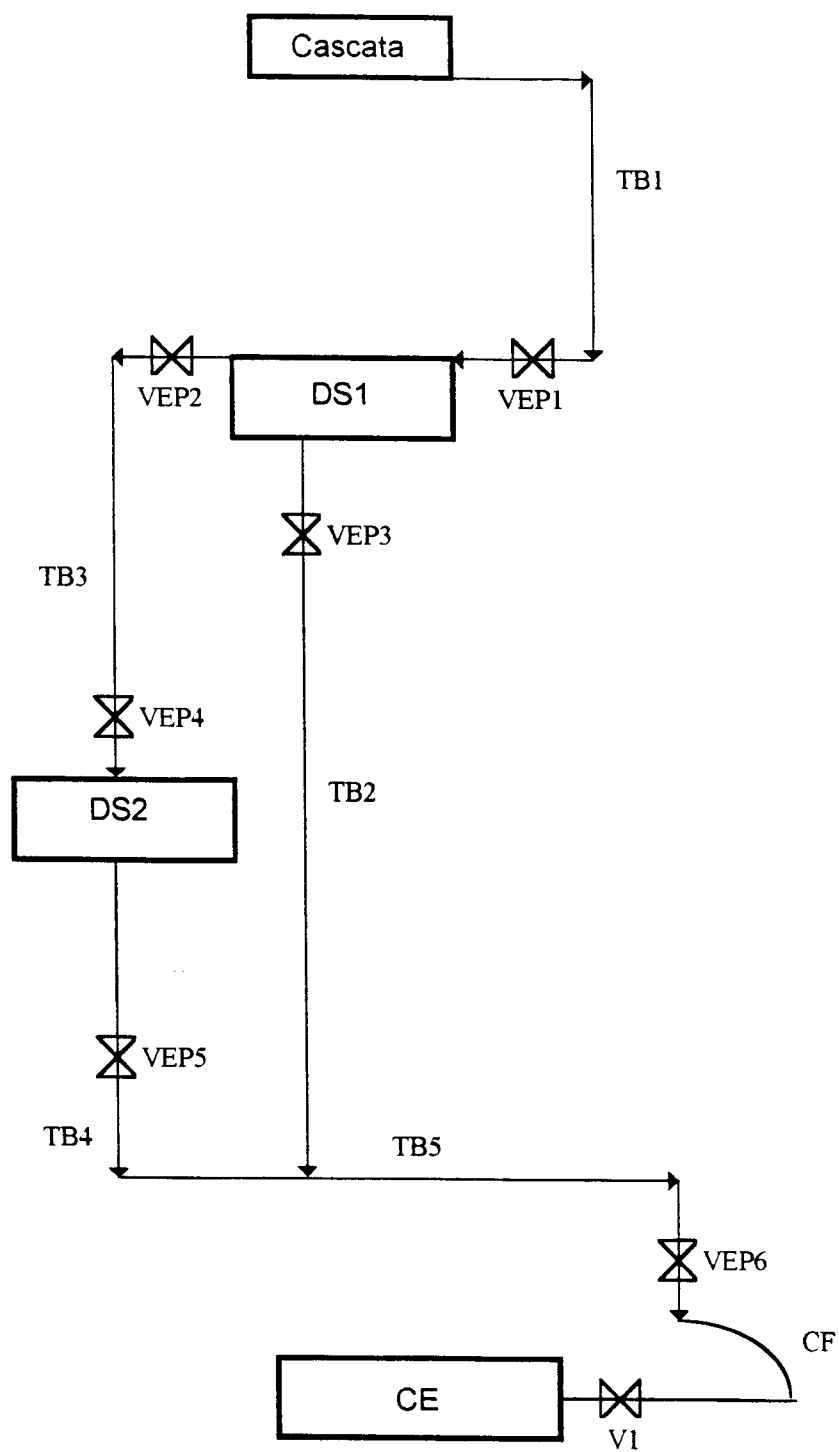


Figura 4.8: Esquema parcial da área de retirada de produto.

4.4.3.2 - Características dos componentes analisados

As características dos componentes da área de retirada de produto analisados pela AMFE são descritas na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Características dos itens da área de retirada de produto.

ITEM	CÓDIGO	DESCRIÇÃO	FUNÇÃO
Tubulação de UF ₆	TB1	Tubulação com 35.10 ⁻³ m de diâmetro	Escoar o UF ₆ gasoso da cascata para o DS1
Tubulação de UF ₆	TB2	Tubulação com 35.10 ⁻³ m de diâmetro	Escoar o UF ₆ líquido do DS1 para a TB5
Tubulação de UF ₆	TB3	Tubulação com 35.10 ⁻³ m de diâmetro	Escoar o UF ₆ gasoso do DS1 para o DS2
Tubulação de UF ₆	TB4	Tubulação com 35.10 ⁻³ m de diâmetro	Escoar o UF ₆ líquido do DS2 para a TB5
Tubulação de UF ₆	TB5	Tubulação com 35.10 ⁻³ m de diâmetro	Escoar o UF ₆ líquido da TB2 e da TB4 para CF do CE
Conexão flexível	CF	Conexão flexível do CE	Conduzir o UF ₆ líquido da TB5 para o CE
Cilindro de estocagem	CE	Cilindro 30B, com capacidade de 2277 kg	Armazenar o UF ₆ enriquecido (3,2% em U-235) oriundo do DS1 e do DS2

Tabela 4.3: Continuação.

ITEM	CÓDIGO	DESCRIÇÃO	FUNÇÃO
Dessublimador primário	DS1	Dessublimador fabricado em Monel, segundo o código ASME, com barbatanas e jaquetas por onde flui Freon 11	Coletar o UF ₆ gasoso da cascata e transferir, por gravidade, o UF ₆ liquefeito para o cilindro de estocagem
Dessublimador secundário	DS2	Dessublimador fabricado em Monel, segundo o código ASME, com barbatanas e jaquetas por onde flui N ₂	Coletar o UF ₆ gasoso remanescente do DS1 e transferir, por gravidade, o UF ₆ liquefeito para o cilindro de estocagem
Válvulas eletro-pneumáticas	VEP1 VEP2 VEP3	Válvulas de isolamento operadas manualmente, abertas na operação normal do sistema	Permitir que o DS1 seja retirado da linha, em caso de falha do mesmo
Válvulas eletro-pneumáticas	VEP4 VEP5	Válvulas de isolamento operadas manualmente, abertas na operação normal do sistema	Permitir que o DS2 seja retirado da linha, em caso de falha do mesmo
Válvula eletro-pneumática	VEP6	Válvula de isolamento, mantida aberta na operação normal do sistema	Permitir que o CE seja retirado da linha, em caso de falha do mesmo
Válvula manual	V1	Válvula do CE	A finalidade desta válvula é abrir ou fechar o CE

4.4.3.3 - Tabela da AMFE

A AMFE da área de retirada de produto está sumarizada na tabela 4.4, onde são analisados os modos de falha de cada componente, bem como suas causas, efeitos no local (em termos operacionais), na planta e no meio ambiente, métodos de detecção e gravidade para a operação da planta e para o meio ambiente, de acordo com os critérios definidos nas tabelas 3.4 e 3.6 (páginas 33 e 34, respectivamente).

Tabela 4.4: AMFE da área de retirada de produto.

Item	Modo de falha	Causa da Falha	Métodos de detecção	Efeitos			Gravidade	
				Local	Planta	Meio Ambiente	Planta	Ambiente
TB1 TB3	Ruptura	Incrustações na tubulação de UF ₆ ou falha mecânica	Instrumentação local da tubulação e detecção visual	Entrada de ar na tubulação, que está sub-pressurizada e pequena liberação de UF ₆	Desprezíveis	Desprezíveis	P1	A1
TB2 TB4 TB5	Ruptura da tubulação durante a transferência líquida	Incrustações na tubulação de UF ₆ ou falha mecânica	Detetores de fumaça observação visual do evento e instrumentação local da tubulação	Vazamento de UF ₆ líquido e acentuada contaminação das áreas afetadas	Desligamento do sistema de ventilação e exaustão e paralização da planta	Contaminação interna à planta e mínima contaminação do solo	P2	A2
	Ruptura da tubulação sem a transferência líquida	Incrustações na tubulação de UF ₆ ou falha mecânica	Observação visual do evento e atuação da instrumentação local da tubulação	Paralização da linha de transferência	Desprezíveis	Desprezíveis	P1	A1

Tabela 4.4 : Continuação.

Item	Modo de falha	Causa da Falha	Métodos de detecção	Efeitos			Gravidade	
				Local	Planta	Meio ambiente	Planta	Ambiente
VEP1	Aberta	Fadiga, tensões, defeitos de fabricação e incrustações de UF ₆ no interior da válvula	Instrumentação de controle da válvula	Não é possível isolar o DS1 da linha	O fluxo de UF ₆ da cascata deve ser redirecionado para outra estação coletora	Desprezíveis	P1	A1
	Fechada	Fadiga, tensões, defeitos de fabricação e incrustações de UF ₆ no interior da válvula	Instrumentação de controle da válvula	Interrupção do fluxo de UF ₆ na TB1, comprometendo a operação do DS1	O fluxo de UF ₆ da cascata deve ser redirecionado para outra estação coletora	Desprezíveis	P1	A1
	Vazamento pela válvula	Defeitos de vedação	Instrumentação de controle da válvula e da linha TB1	Entrada de ar na tubulação TB1, causando perda da sub-pressurização da linha	O fluxo de UF ₆ da cascata deve ser redirecionado para outra estação coletora	Desprezíveis	P1	A1

Tabela 4.4 : Continuação.

Item	Modo de falha	Causa da Falha	Métodos de detecção	Efeitos			Gravidade	
				Local	Planta	Ambiente	Planta	Ambiente
VEP2	Aberta	Fadiga, tensões, defeitos de fabricação e incrustações de UF ₆ no interior da válvula	Instrumentação de controle da válvula	Não é possível isolar o DS1 da linha	O fluxo de UF ₆ da TB3 deve ser redirecionado para outra estação coletora	Desprezíveis	P1	A1
	Fechada	Fadiga, tensões, defeitos de fabricação e incrustações de UF ₆ no interior da válvula	Instrumentação de controle da válvula	Interrupção do fluxo de UF ₆ na TB3, comprometendo a operação do DS1	O fluxo de UF ₆ da TB3 deve ser redirecionado para outra estação coletora	Desprezíveis	P1	A1
Vazamento	Defeitos de vedação	Defeitos de vedação	Instrumentação de controle da válvula e detectores de fumaça	Como a TB3 está sobre-pressurizada, haverá vazamento de UF ₆ líquido e contaminação local	Desligamento do sistema de ventilação e exaustão e paralização da planta	Contaminação interna à planta e mínima contaminação do solo	P2	A2

Tabela 4.4 : Continuação.

Item	Modo de falha	Causa da Falha	Métodos de detecção	Efeitos			Gravidade	
				Local	Planta	Ambiente	Planta	Ambiente
VEP3	Aberta	Fadiga, tensões, defeitos de fabricação e incrustações de UF ₆ no interior da válvula	Instrumentação de controle da válvula	Não é possível isolar o DS1 da linha	O fluxo de UF ₆ da TB2 deve ser redirecionado para outra estação coletora	Desprezíveis	P1	A1
	Fechada	Fadiga, tensões, defeitos de fabricação e incrustações de UF ₆ no interior da válvula	Instrumentação de controle da válvula	Interrupção do fluxo de UF ₆ na TB2, comprometendo a operação do DS1	O fluxo de UF ₆ da TB2 deve ser redirecionado para outra estação coletora	Desprezíveis	P1	A1
	Vazamento	Defeitos de vedação	Instrumentação de controle da válvula e detectores de fumaça	Como a TB2 está sobre-pressurizada, haverá vazamento de UF ₆ líquido e contaminação local	Desligamento do sistema de ventilação e exaustão e paralisação da planta	Contaminação interna à planta e mínima contaminação do solo	P2	A2

Tabela 4.4 : Continuação.

Item	Modo de falha	Causa da Falha	Métodos de detecção	Efeitos			Gravidade	
				Local	Planta	Meio ambiente	Planta	Ambiente
VEP4	Aberta	Fadiga, tensões, defeitos de fabricação e incrustações de UF ₆ no interior da válvula	Instrumentação de controle da válvula	Não é possível isolar o DS2 da linha	O fluxo de UF ₆ da TB3 deve ser redirecionado para outra estação coletora	Desprezíveis	P1	A1
	Fechada	Fadiga, tensões, defeitos de fabricação e incrustações de UF ₆ no interior da válvula	Instrumentação de controle da válvula	Interrupção do fluxo de UF ₆ na TB3, comprometendo a operação do DS2	O fluxo de UF ₆ da TB3 deve ser redirecionado para outra estação coletora	Desprezíveis	P1	A1
	Vazamento pela válvula	Defeitos de vedação	Instrumentação de controle da válvula e da linha TB3	Entrada de ar na tubulação TB3, causando perda da sub-pressurização da linha	O fluxo de UF ₆ da TB3 deve ser redirecionado para outra estação coletora	Desprezíveis	P1	A1

Tabela 4.4 : Continuação.

Item	Modo de falha	Causa da Falha	Métodos de detecção	Efeitos			Gravidade	
				Local	Planta	Ambiente	Planta	Ambiente
VEP5	Aberta	Fadiga, tensões, defeitos de fabricação e incrustações de UF ₆ no interior da válvula	Instrumentação de controle da válvula	Não é possível isolar o DS2 da linha	O fluxo de UF ₆ da TB4 deve ser redirecionado para outra estação coletora	Desprezíveis	P1	A1
	Fechada	Fadiga, tensões, defeitos de fabricação e incrustações de UF ₆ no interior da válvula	Instrumentação de controle da válvula	Interrupção do fluxo de UF ₆ na TB4, comprometendo a operação do DS2	O fluxo de UF ₆ da TB4 deve ser redirecionado para outra estação coletora	Desprezíveis	P1	A1
	Vazamento pela válvula	Defeitos de vedação	Instrumentação de controle da válvula e detectores de fumaça	Como a TB4 está sobre-pressurizada, haverá vazamento de UF ₆ líquido e contaminação local	Desligamento do sistema de ventilação e exaustão e paralização da planta	Contaminação interna à planta e mínima contaminação do solo	P2	A2

Tabela 4.4 : Continuação.

Item	Modo de falha	Causa da Falha	Métodos de detecção	Efeitos			Gravidade	
				Local	Planta	Ambiente	Planta	Ambiente
VEP6	Aberta	Fadiga, tensões, defeitos de fabricação e incrustações de UF ₆ no interior da válvula	Instrumentação de controle da válvula	Não é possível isolar a TB5	Possível excesso de carga no CE	Desprezíveis	P1	A1
	Fechada	Fadiga, tensões, defeitos de fabricação e incrustações de UF ₆ no interior da válvula	Instrumentação de controle da válvula	Interrupção do fluxo de UF ₆ na TB5, comprometendo a operação do CE	Paralização da área afetada	Desprezíveis	P1	A1
	Vazamento pela válvula	Defeitos de vedação	Instrumentação de controle da válvula e detectores de fumaça	Vazamento de UF ₆ líquido e contaminação das áreas vizinhas	Desligamento do sistema de ventilação e exaustão e paralização da planta	Contaminação interna à planta e mínima contaminação do solo	P2	A2

Tabela 4.4: Continuação.

Item	Modo de falha	Causa da Falha	Métodos de detecção	Efeitos			Gravidade	
				Local	Planta	Meio ambiente	Planta	Ambiente
DS1 DS2	Ruptura mecânica do equipamento contendo UF ₆ líquido	Excesso de carga de UF ₆ no dessublimador ou corrosão do equipamento	Detectores de fumaça, observação visual do evento e instrumentação do dessublimador	Contaminação local por UF ₆ líquido	Desligamento do sistema de ventilação e exaustão e paralização da área afetada	Contaminação interna à planta e mínima contaminação do solo	P2	A2
	Ruptura mecânica do equipamento contendo UF ₆ sólido	Excesso de carga de UF ₆ no dessublimador ou corrosão do equipamento	Instrumentação do dessublimador	Isolamento do dessublimador para reparos	Redirecionamento do fluxo de UF ₆ para outra estação coletora	Desprezível	P1	A1
CF	Desconexão da CF do CE durante a transferência líquida	Movimento da plataforma sobre a qual o cilindro 30B se apóia	Detectores de fumaça e observação visual do evento	Contaminação local por UF ₆ líquido	Fechamento do sistema de ventilação e exaustão e paralização da planta	Contaminação interna à planta e mínima contaminação do solo	P2	A2

Tabela 4.4: Continuação.

Item	Modo de falha	Causa da Falha	Métodos de detecção	Efeitos			Gravidade	
				Local	Planta	Meio ambiente	Planta	Ambiente
CE	Ruptura mecânica do corpo do cilindro	Excesso de carga no CE, devido a um erro operacional	Detectores de fumaça atuação do indicador de peso instalado no CE	Contaminação local por UF ₆	Desligamento do sistema de ventilação e exaustão	Contaminação interna à planta e mínima contaminação do solo	P2	A2

4.4.3.4 - Resultados da AMFE

A AMFE do sistema de retirada de produto levou à identificação de 32 eventos indesejáveis. A tabela 4.5 apresenta uma estatística desses eventos em função dos principais componentes desse sistema, e a figura 4.9 mostra a distribuição dos mesmos.

Tabela 4.5: Estatística dos eventos indesejáveis na área de retirada de produto

Componente	Gravidade							
	Planta				Meio Ambiente			
	P1	P2	P3	P4	A1	A2	A3	A4
Tubulações	5	3	0	0	5	3	0	0
Válvulas	14	4	0	0	14	4	0	0
Dessublimadores	2	2	0	0	2	2	0	0
Cilindro de estocagem	0	1	0	0	0	1	0	0
Conexão flexível	0	1	0	0	0	1	0	0

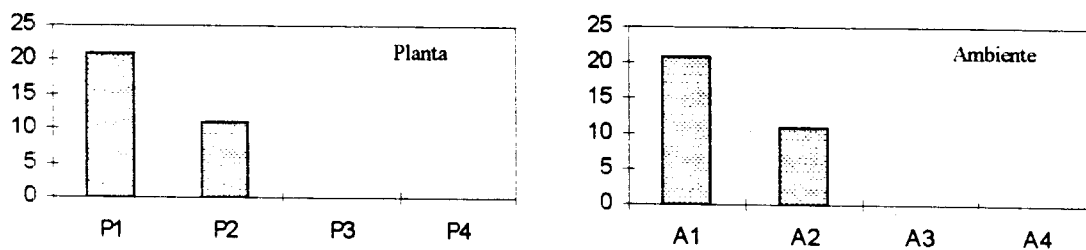


Fig. 4.9: Distribuição dos eventos indesejáveis (planta e meio ambiente)

Dos eventos indesejáveis analisados, os mais relevantes são os de gravidade P2 e A2, correspondendo às seguintes situações previstas no item 4.4.2.1:

- C6- Ruptura de tubulação que transporta UF₆ enriquecido durante a transferência líquida.
- C7- Falha em válvula eletro-pneumática, ocasionando liberação de UF₆ líquido.
- C8- Ruptura do dessublimador primário ou secundário contendo UF₆ líquido.
- C9- Falha da conexão flexível durante a transferência líquida.

Os eventos C6, C7, C8 e C9 totalizam 10 situações (cerca de 31% da AMFE), distribuídas conforme mostrado pelas figuras 4.10 e 4.11.

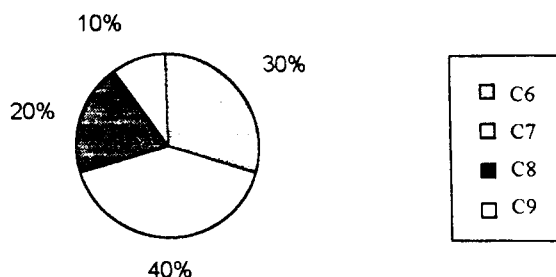


Fig. 4.10: Distribuição dos eventos indesejáveis mais relevantes.

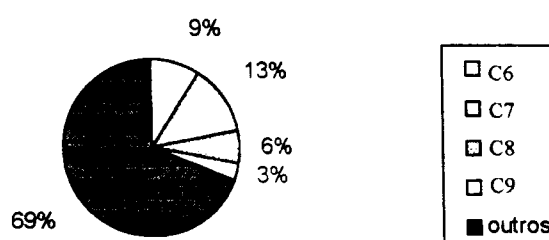


Fig. 4.11: Distribuição de todos os eventos indesejáveis.

Na seção 4.4.2 foram identificados os eventos indesejáveis nas principais áreas da CPDF. Comparando-se a gravidade dos eventos postulados na área de retirada de produto com os das outras áreas, verifica-se que:

1. Os eventos indesejáveis mais relevantes na área de alimentação e na cascata podem causar o vazamento de UF_6 gasoso em pequenas quantidades, enquanto na área de retirada de produto os vazamentos correspondem ao UF_6 líquido e as quantidades envolvidas são bem maiores.
2. Embora a quantidade e o estado físico do UF_6 que pode vaziar nas áreas de retirada de rejeito e de produto sejam equivalentes, na última processa-se urânio enriquecido, devendo-se avaliar os perigos associados à radiação. Entretanto, nas condições praticadas na CPDF, a toxicidade química do urânio supera a radiológica.

4.4.4 - Classificação dos casos de vazamentos

Para efeito de análise, os vazamentos de UF_6 foram agrupados em cinco casos distintos representativos dos eventos de possível ocorrência na CPDF:

- Caso A: Vazamento de UF₆ gasoso na área de alimentação.
- Caso B: Vazamento de UF₆ gasoso na área de cascata.
- Caso C: Vazamento de UF₆ líquido na área de retirada de produto.
- Caso D: Vazamento de UF₆ líquido na área de retirada de rejeito.

4.4.5 - Determinação dos termo-fontes

- Caso A: Rompimento da tubulação ou da válvula do cilindro de alimentação.
⇒ Admite-se que a vazão operacional do sistema ($1,7 \cdot 10^{-3}$ kg/s) permaneça inalterada por um período de 900 s (15 min), causando o vazamento de aproximadamente 2 kg de UF₆ gasoso na área de alimentação.
- Caso B: Rompimento das tubulações da cascata.
⇒ Admite-se o vazamento de todo UF₆ (0,5 kg) presente na cascata para o interior do edifício. Esta hipótese é muito conservativa, pois presume que ocorra vazamento simultâneo nas 120 centrífugas e em todas as tubulações da cascata.
- Caso C: Rompimento da tubulação que transporta UF₆ enriquecido durante a transferência líquida
⇒ Admite-se, conservativamente, o vazamento de todo UF₆ presente em um dessublimador (136 kg), durante um período de 900 s (15 min), na área de retirada de produto.
- Caso D: Rompimento de uma tubulação que transporta UF₆ depletado durante a transferência líquida
⇒ Admite-se, conservativamente, o vazamento de todo UF₆ presente em um dessublimador (136 kg), durante 900 s (15 min), na área de retirada de rejeito.

4.4.6 - Avaliação de consequências

A avaliação das consequências de liberações de UF₆ requer o conhecimento das suas propriedades físico-químicas e da sua toxicidade, do estabelecimento de critérios de classificação de eventos e da adoção de um modelo de dispersão atmosférica.

4.4.6.1 - Propriedades do UF₆

4.4.6.1.1 - 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 4.6 e a figura 4.12 ilustra o diagrama de fases do UF₆.

As propriedades físicas do UF₆ de interesse nos processos empregados em usinas de enriquecimento isotópico são:

1. A diminuição do ponto de sublimação com a queda da pressão: em pressões inferiores à atmosférica, o UF₆ sublima em temperaturas mais baixas. Essa característica possibilita o uso do UF₆ gasoso nas cascatas de enriquecimento.
2. A elevada expansão volumétrica do UF₆ na mudança de fase 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 à expansão volumétrica do líquido (qualquer aquecimento adicional causará ao líquido confinado o desenvolvimento de pressões hidráulicas, o que pode causar danos ao cilindro).

Tabela 4.6: 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	$4,6 \cdot 10^6$ Pa
Temperatura crítica	230.2 °C
Ponto triplo	64 °C
Temperatura de sublimação ($1,01 \cdot 10^5$ Pa)	56.4 °C

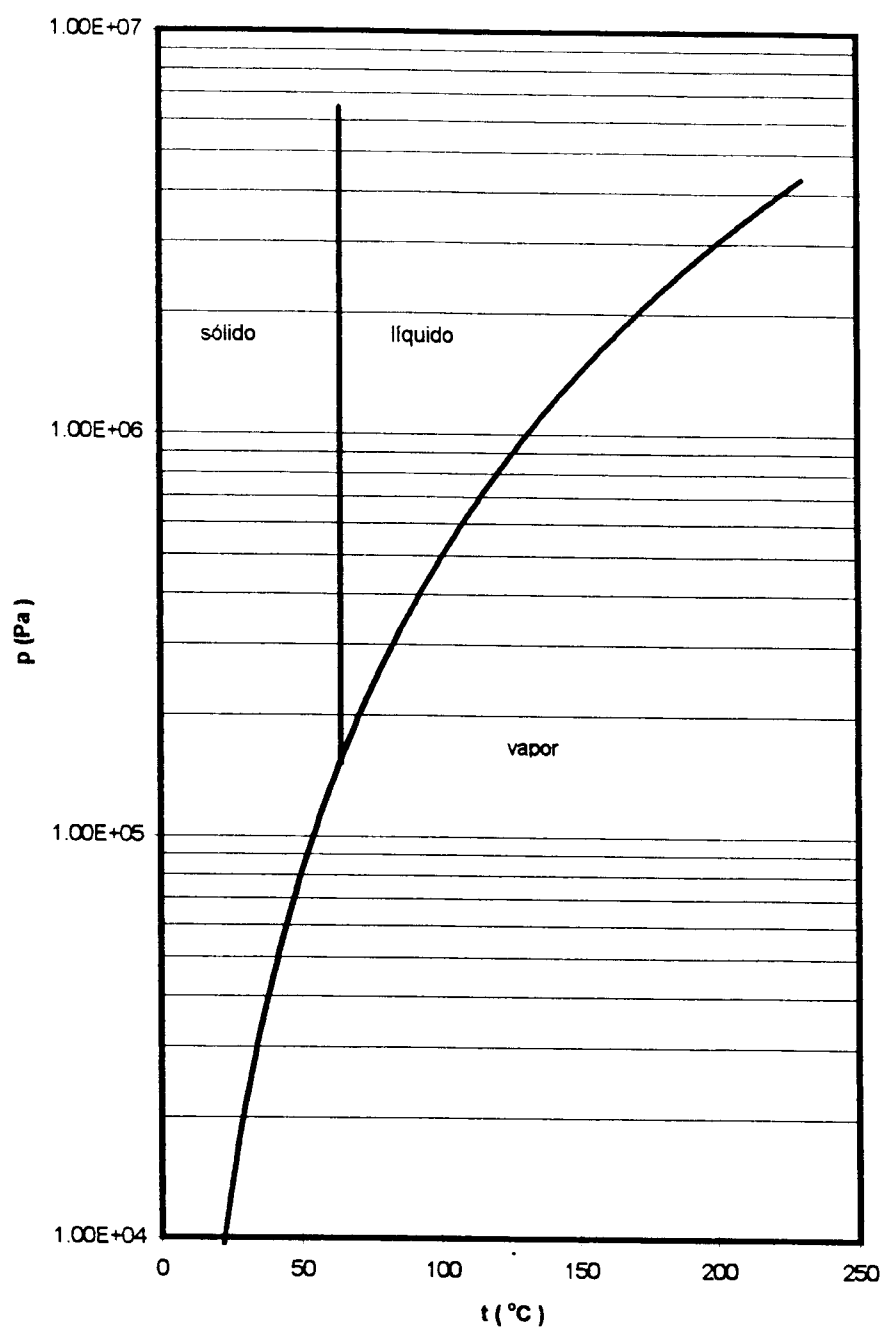


Figura 4.12: Diagrama de fases do UF_6

Ponto Triplo: 64°C , $1,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Ponto de sublimação: $56,4^\circ\text{C}$, $1,01 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Somente na combinação de pressão e temperatura descritas pelo ponto triplo, ou seja, $1,5 \cdot 10^5$ Pa e 64°C , é que as três fases (sólido, líquido e gás) do UF_6 podem existir simultaneamente. As linhas do gráfico representam estados de equilíbrio entre duas fases (sólido e gás, sólido e líquido, líquido e gás), determinado por condições específicas de pressão e temperatura. A alteração da pressão, da temperatura ou de ambas acarreta mudança de fase do composto.

4.4.6.1.2 - Propriedades Químicas do UF_6

Embora o UF_6 seja um composto estável, ele possui algumas propriedades que o tornam de manipulação complexa. O UF_6 é altamente reativo com água, éter e álcool, formando produtos estáveis.

A reação do UF_6 com a água produz UO_2F_2 (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 UF_6 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 UF_6 gasoso com hidrocarbonetos, como óleos e graxas, apresenta como produto um resíduo preto de composto de urânio e carbono. Se o UF_6 estiver na fase líquida, essa reação é rápida e pode ser violenta em temperaturas elevadas, havendo o risco de explosões no interior de cilindros. Logo, deve-se prevenir o contatos de óleos lubrificantes dos equipamentos com o UF_6 presente nos cilindros.

O UF_6 é inerte em relação ao oxigênio, ao nitrogênio, ou seja, ao ar seco.

4.4.6.1.3 - Toxicidade do UF_6 e dos seus produtos de hidrólise

O UF_6 enriquecido é um composto tóxico, radioativo e reativo com várias substâncias, podendo causar danos à saúde e contaminação ao meio ambiente.

O UF_6 liberado para a atmosfera reage com a umidade do ar, produzindo UO_2F_2 e HF. O HF apresenta apenas toxicidade química, enquanto os compostos solúveis do urânio (UF_6 e UO_2F_2) apresentam toxicidade química e radiológica.

O UO_2F_2 é um composto do U de alta solubilidade, passando rapidamente dos pulmões para a corrente sanguínea quando inalado. O efeito da inalação do UF_6 está combinado com os efeitos do UO_2F_2 e do HF, pois o UF_6 sofre hidrólise nos pulmões.

A toxicidade química do U supera a radiológica em compostos com enriquecimento inferior a 10% em U-235 ou para exposições agudas (independentemente do nível de enriquecimento).

O efeito tóxico mais preocupante do U é o dano aos tecidos renais, chegando à perda da capacidade funcional, afetando os vasos sanguíneos de todo organismo. A permeabilidade capilar e a pressão sanguínea aumentam, enquanto a capacidade de coagulação diminui. O U pode danificar as membranas capilares e prejudicar o fígado e os tecidos musculares. Seu efeito no sistema nervoso é similar a outros metais pesados.

O limiar de dano renal é $5,8 \cdot 10^{-8}$ kg de U por quilo no indivíduo, quantificado através de exame de urina, indicando alterações estruturais nos rins. Essas mudanças são transientes, pois a composição da urina logo retorna ao normal. Exames microscópicos nos rins podem detectar danos depois de semanas da exposição.

Segundo a norma USNCR (10 CFR 20 /42/), o limite de incorporação aguda de urânio solúvel para trabalhadores é $9,6 \cdot 10^{-6}$ kg por semana (baseando-se na toxicidade química). O documento NUREG 1391 /6/ arredondou esse valor para $10 \cdot 10^{-6}$ kg, sendo esta a 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 de curto prazo (short- term effects), conforme mostrado na tabela 4.7.

4.4.6.1.4- Toxicidade do ácido fluorídrico

O HF é um ácido corrosivo, podendo ser fatal no caso de exposições agudas (ele ataca os brônquios, causando inchaço pulmonar). Em exposições moderadas no ar, o HF pode causar queimaduras na pele, além de irritações no aparelho respiratório e na membrana conjuntiva. Quando aquecido, o HF libera fumos altamente tóxicos.

Os efeitos devidos à inalação do ácido fluorídrico foram determinados através de experimentos com animais e estão sumarizados na tabela 4.8.

Segundo NIOSH (1985) /22/, a concentração de HF no ar descrita como imediatamente perigosa à saúde é de $25 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$, ou seja, 30 ppm (IDLH). Nesse documento consta a concentração de HF que pode ser tolerada durante 1800 s (30 min) sem efeitos irreversíveis à saúde, mas não há valores para diferentes intervalos de tempo.

Para intervalos de tempo diferentes de 1800 s (30 min), a concentração equivalente ao valor IDLH de $25 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ é dada pela expressão /6/:

$$C_{\text{HF}} = 25 \cdot (1800/t)^{1/2} \quad (4.1)$$

onde:

C_{HF} : concentração de HF equivalente ao IDHL (10^{-6} kg/m^3);

t: tempo de exposição (s)

A tabela 4.9 mostra concentrações de HF equivalentes ao IDLH para vários períodos de exposição, calculadas a partir da equação 4.1.

4.4.6.2 - Critério de classificação de eventos indesejáveis

Neste trabalho são utilizados dois critérios distintos para a classificação de vazamentos de UF_6 (e conseqüente liberação 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 e radiológicos, é o proposto nas tabelas 3.1 e 3.2 por Hanamann et alli /25/. Nesse critério, as conseqüências 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 no caso do U solúvel e do HF, de acordo com a tabela 4.10.

O segundo critério, exclusivamente toxicológico, é o proposto no documento NUREG 1391 /6/, em que o parâmetro IDLH é adotado na classificação de conseqüências, para indivíduos do público, como evento anormal ou acidente, conforme apresentado na tabela 4.11. No presente estudo, assume-se o valor de $2 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$ de incorporação de urânio como limite inferior na classificação de eventos anormais.

Tabela 4.7: Efeitos adversos à saúde devido a inalação de urânio (U).

Efeitos	U (kg) por kg no indivíduo (kg de U/ kg)	U (kg) em pessoa de 70 kg	U (kg) inalado por pessoa de 70 kg
50% de letalidade	$1,63.10^{-6}$	114.10^{-6}	230.10^{-6}
Limite para dano renal permanente	$0,30.10^{-6}$	21.10^{-6}	40.10^{-6}
Limite para dano renal transiente	$0,058.10^{-6}$	$4,06.10^{-6}$	$8,3.10^{-6}$
Nenhum efeito	$0,03.10^{-6}$	$2,1.10^{-6}$	$4,3.10^{-6}$

Fonte: NUREG 1391 /6/

Tabela 4.8: Efeitos da inalação de ácido fluorídrico (HF) em animais.

Concentração de HF (10^{-6} kg/m ³)	Efeito
1500	Alguns animais morrem em 300 s (5 min) de exposição
1000	Nenhum animal morre em 900 s (30 min) ou menos de exposição, mas houve danos
500	Alguns animais expostos por 900 s (15 min) ou mais demonstram sinais de cansaço e mal estar
100	Pode ser tolerado por 1800 0s (5 h) sem causar morte, mas causa irritação severa
50	Coelhos e porcos apresentam irritação na garganta e tosse após 300 a 900 s (5 a 15 min) de exposição
24	Tolerado por 147600 s (41 h) sem apresentar fatalidade, mas alguns animais perderam peso.

Fonte: NUREG 1391 /6/

Tabela 4.9: Concentração de HF equivalente ao valor do IDLH.

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

Fonte: NUREG 1391 /6/

Tabela 4.10: Valores que definem grupos para o U solúvel e para o HF.

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

Tabela 4.11: 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);

4.4.6.3 - Dispersão atmosférica de substâncias

O modelo de dispersão atmosférica utilizado é o gaussiano, que determina a concentração, ao nível do solo, de um efluente liberado continuamente por uma fonte pontual, a uma altura elevada /43/, /44/:

$$X(x, y) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \cdot \exp\left[\frac{-1}{2} \cdot \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{H^2}{\sigma_z^2}\right)\right] \quad (4.2)$$

onde:

X = concentração média do efluente no ponto (x, y, z) (kg/m^3)

Q = intensidade da fonte, isto é, taxa de liberação do efluente (kg/s)

u = velocidade do vento (m/s)

(assumida segundo o 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 (A, B, C, D, E e F), podem ser obtidos através de expressões desenvolvidas por Eimuts e Konicek /45/ e estão representados nas figuras 4.13 e 4.14. As expressões de σ_y e σ_z são apresentadas no anexo II.

$$\text{A altura efetiva } H \text{ é dada por: } H = h + \Delta h \quad (4.3)$$

onde:

h : altura da chaminé (m)

Δh : "plume-rise" (elevação da pluma)

Pelo fato da reação do UF_6 com a umidade atmosférica ser exotérmica, caso haja liberação de UF_6 para o meio ambiente, a pluma sofrerá uma elevação Δh . Segundo NUREG 1140 /6/, a elevação devido à diferença térmica pode atingir 20 m.

A expressão utilizada neste trabalho no cálculo de Δh é dada por /46/:

$$\Delta h = 0,358 \cdot \frac{Q_h^{0.5}}{u^{0.75}} \quad (4.4)$$

onde:

Q_h : calor de emissão (J/s)

No caso do UF_6 , Q_h pode ser calculado a partir da energia liberada na reação do UF_6 com a umidade do ar.

A figura 4.15 apresenta um gráfico de X/Q em função da distância, considerando-se liberação ao nível do solo ($H=0$), para as classes de estabilidade Pasquill D (neutra: $u = 3$ m/s) e F (moderadamente estável: $u = 1$ m/s).

Assumindo liberação contínua ao nível do solo e incluindo o fator de correção devido ao efeito "building-wake", a equação de dispersão fica /43/:

$$\frac{X}{Q} = \frac{1}{u(\pi\sigma_y\sigma_z + C \cdot A)} \quad (4.5)$$

onde:

X/Q = fator de dispersão atmosférica (s/m^3)

$C \cdot A$ = 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 de particulados, devido a ação gravitacional durante a dispersão da pluma, a incorporação de urânio deverá ser corrigida pelo fator f_d dado por /43/:

$$f_d = \exp \left(-\sqrt{2\pi} \cdot \frac{v_d}{u} \cdot \int_0^x \frac{dx}{\sigma_z \cdot \exp\left(\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right)} \right) \quad (4.6)$$

onde:

v_d = velocidade de deposição (m/s)

A figura 4.16 apresenta curvas do fator de deposição seca em função da distância para as classes de estabilidade Pasquill D e F. Para ambas as condições foi considerada uma velocidade típica de deposição igual a 0,01 m/s /43/.

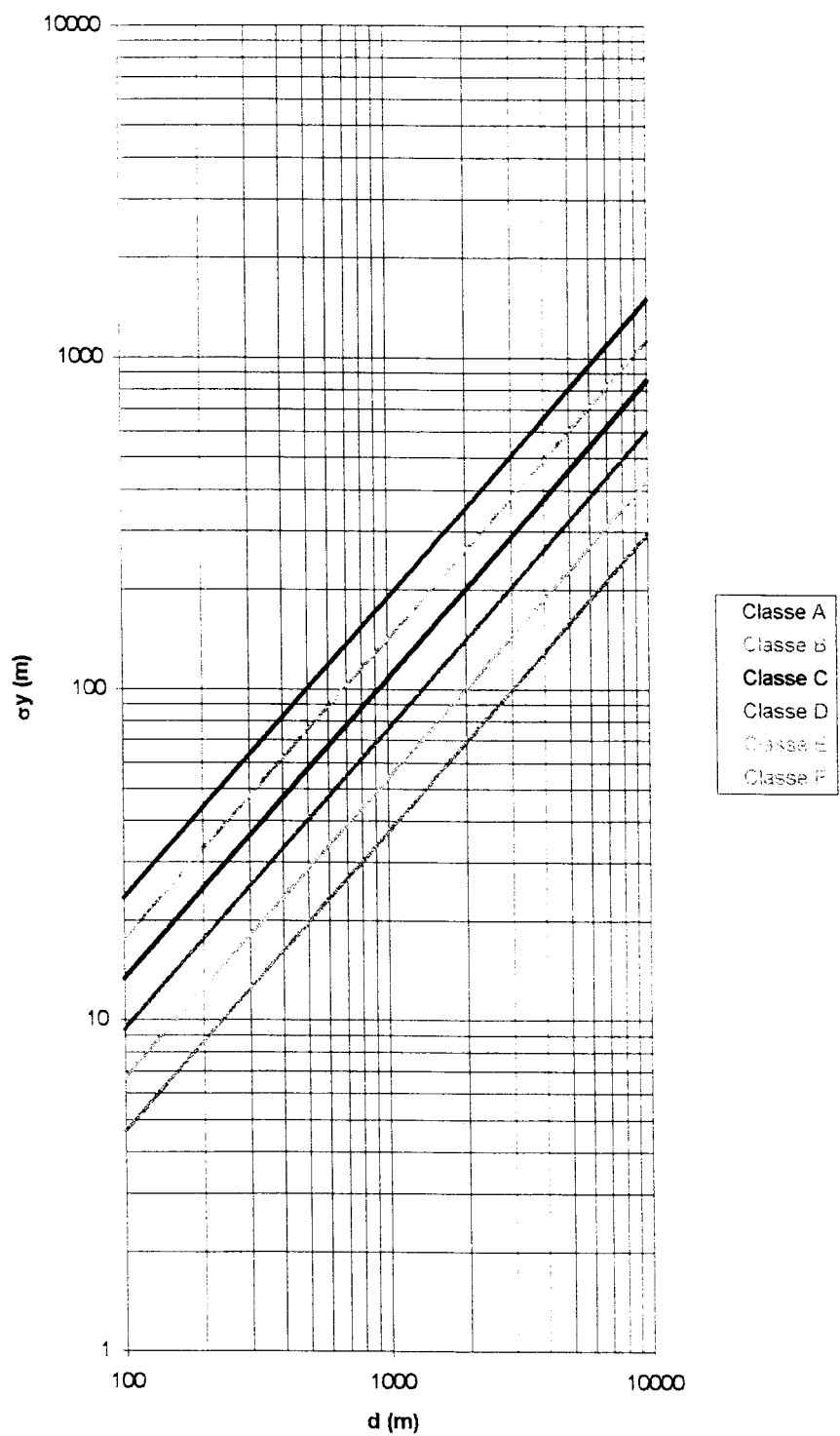


Fig.4.13: Flutuação horizontal σ_y em função da distância

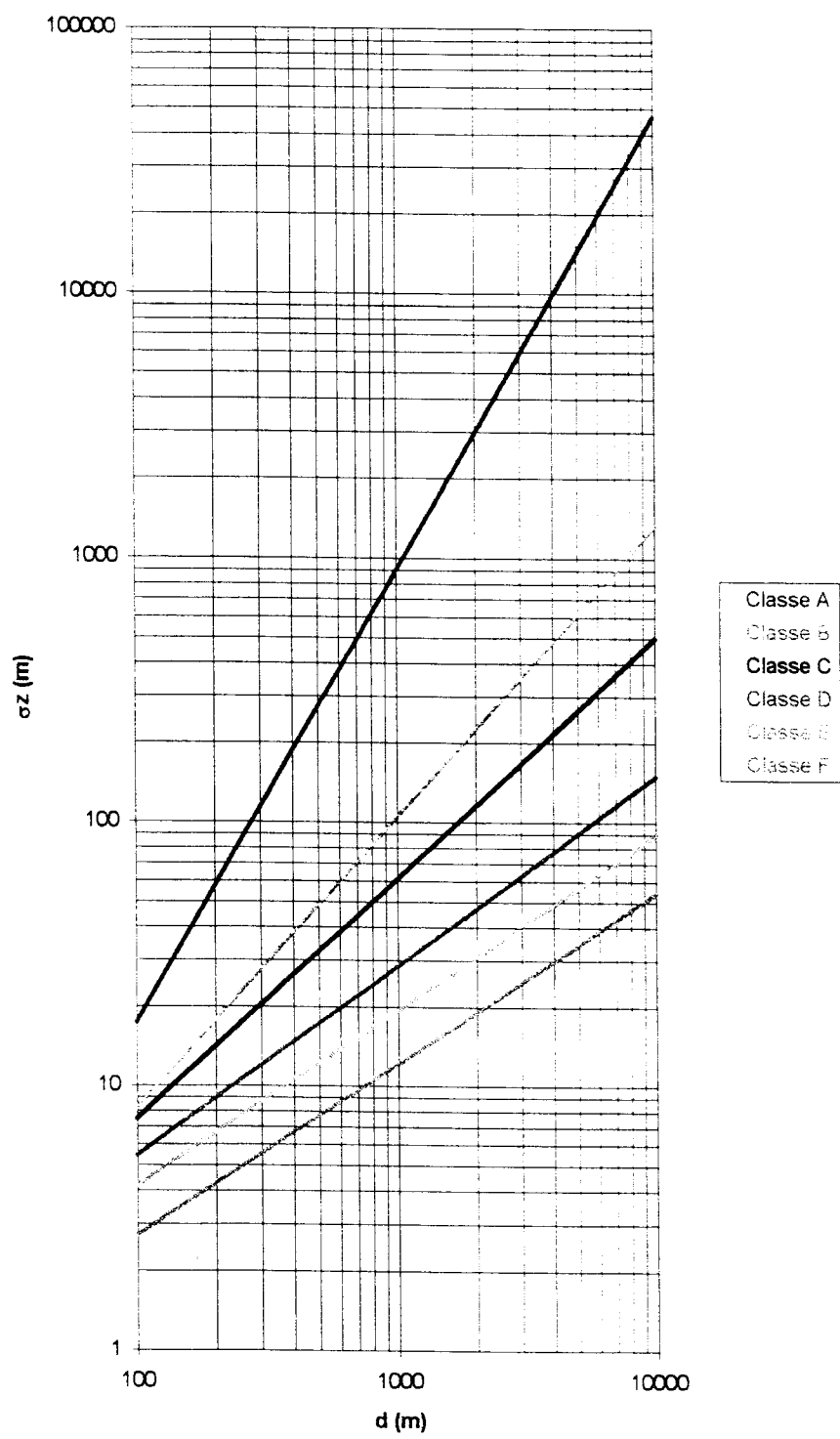


Fig.4.14: Flutuação vertical σ_z em função da distância

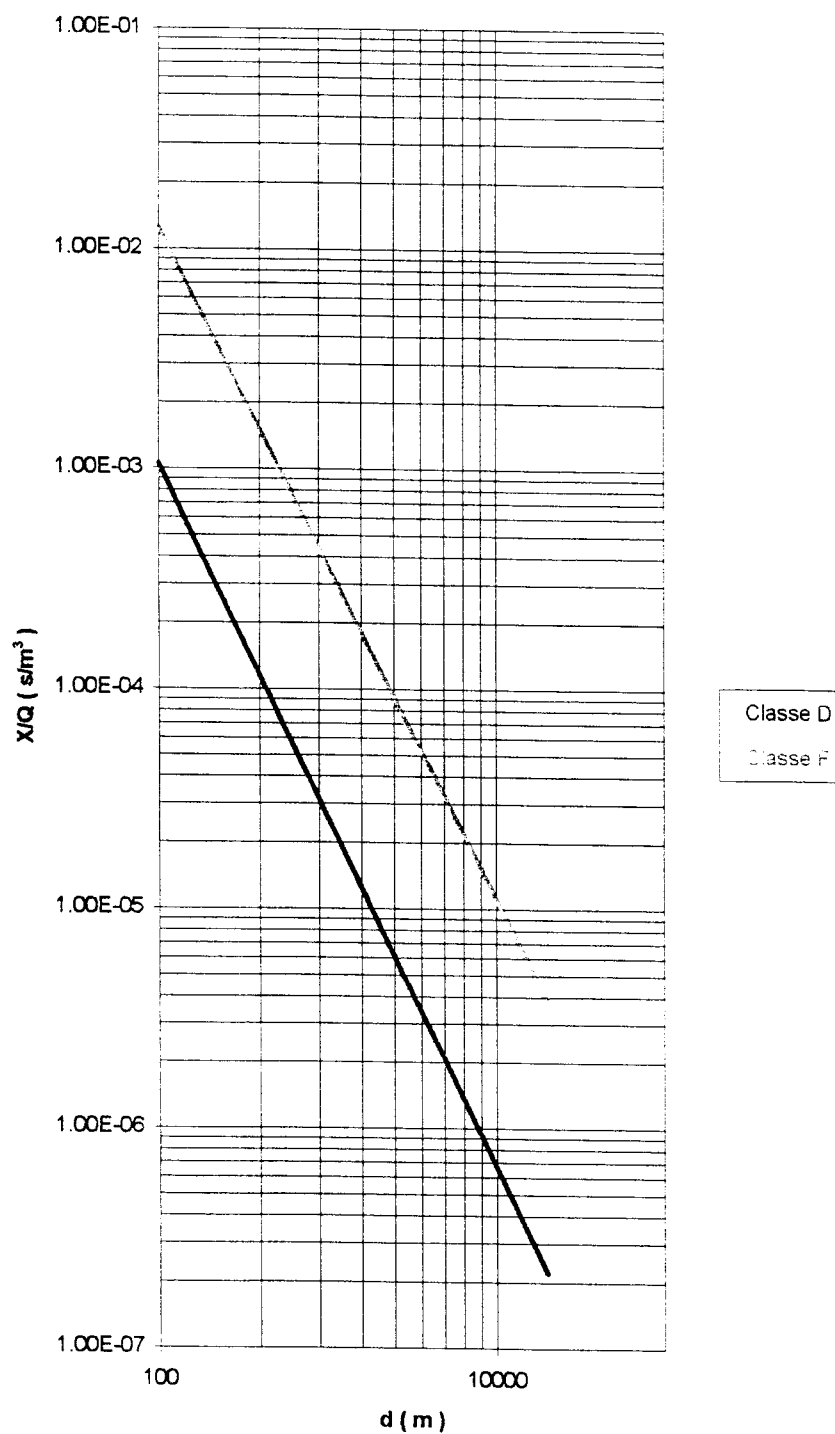


Figura 4.15: X/Q (s/m^3) em função da distância para as classes D e F, considerando-se liberação ao nível do solo.

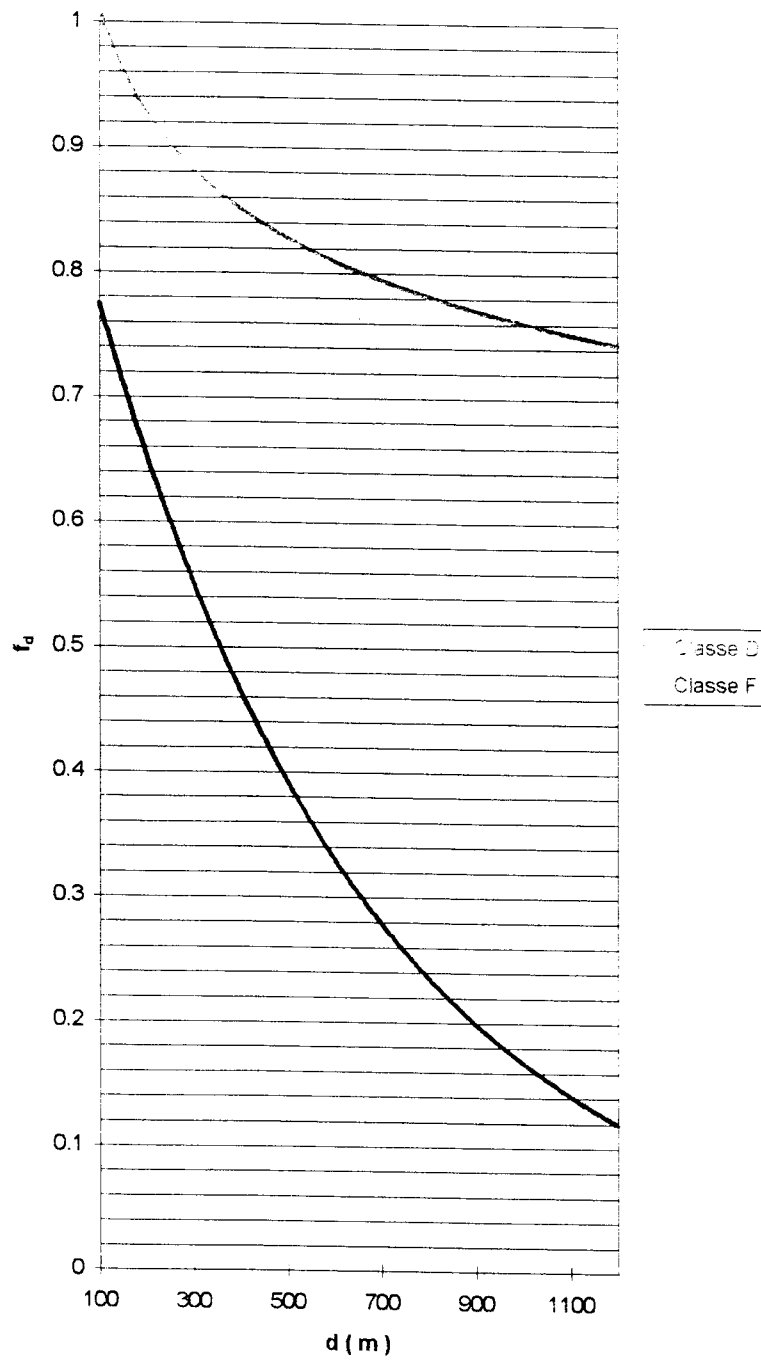


Fig.4.16: Fator de deposição seca em função da distância para classes D e F

4.4.6.4 - Análise de consequências

Na análise de consequências, 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 incorporação de urânio, via inalação, é calculada pela expressão /43/:

$$IU = \left(\frac{X}{Q} \right) \cdot Mu \cdot BR \cdot f_d \quad (4.7)$$

onde:

IU = massa de urânio incorporada (kg)

BR = taxa de respiração média de um indivíduo adulto, considerada $2,66 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, segundo a referência /43/.

Mu = massa de urânio liberada (kg)

Os particulados resultantes da liberação do UF_6 têm diâmetro de aproximadamente 10^{-6} m , sendo, portanto, altamente respiráveis e transportáveis.

Concentração de HF

A concentração de HF no ar é dada pela equação /43/:

$$C_{HF} = \left(\frac{M_{HF}}{t} \right) \cdot \left(\frac{X}{Q} \right) \quad (4.8)$$

onde:

C_{HF} = concentração de HF (kg/m^3)

M_{HF} = massa de HF formada na hidrólise do UF_6 liberado (kg)

t = tempo de liberação (s)

Dose equivalente efetiva comprometida

A dose equivalente efetiva comprometida de urânio, via inalação, é determinada pela equação /43/:

$$D_e = \sum_{i=1}^n \left(\frac{X}{Q} \right) \cdot A_i \cdot DCF_{e_i} \cdot BR \cdot f_d \quad (4.9)$$

onde:

D_e = dose equivalente efetiva comprometida (Sv)

A_i = atividade específica do isótopo i liberado (Bq/kg)

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

A dose equivalente por órgão é dada por:

$$D_o = \sum_{i=1}^n \left(\frac{X}{Q} \right) \cdot A_i \cdot DCF_{o_i} \cdot BR \cdot f_d \quad (4.10)$$

onde:

D_o = dose comprometida por órgão (Sv)

DCF_{o_i} = fator de conversão de dose por órgão para o isótopo i (Sv/Bq)

O urânio é constituído por uma mistura de isótopos de U-235, U-234 e U-238. O U-234 é o isótopo que possui menor meia-vida e emite partículas de maior energia, sendo, portanto, o de maior contribuição no cálculo de doses /47/. No anexo III constam tabelas que reproduzem características nucleares dos isótopos do urânio. As tabelas III.1 e III.2, extraídas da referência /48/, mostram os fatores de conversão de dose efetiva para todos os órgão e por órgão (ossos, rins e pulmão), por inalação, dos isótopos do urânio. A abundância isotópica do urânio é obtida da referência /49/, reproduzida na tabela III.3 do Anexo III.

A atividade específica de um isótopo é dada pela seguinte expressão /50/:

$$A_i = 25,641 \cdot \frac{N_A}{M \cdot \zeta} \quad (4.11)$$

onde:

A_i = atividade específica do radionuclídeo (GBq/kg)

N_A = constante de Avogrado ($6,023 \cdot 10^{23}$)

M = massa atômica do radionuclídeo (kg)

ζ = tempo de meia-vida do radionuclídeo (s)

4.4.6.5 - Programa CONV_ACI

Os cálculos descritos nas seções 4.4.6.3 e 4.4.6.4 foram realizados utilizando-se o programa computacional CONV_ACI /51/. Inserindo-se como dados de entrada as quantidades liberadas, o tempo e a altura de liberação, a velocidade de deposição, as condições atmosféricas e a distância, pode-se obter a incorporação de urânio, a concentração de HF, as doses equivalentes comprometidas por órgão (ossos, rins e pulmão) e para corpo inteiro e o fator de deposição seca. O anexo IV lista os dados de entrada e de saída do programa CONV_ACI.

4.4.7 - Resultados

4.4.7.1 - Avaliação quantitativa do termofonte Caso C

A área de retirada de produto é a que apresenta o maior perigo potencial para a instalação em estudo, pois nela o UF₆ se encontra no estado líquido e em quantidades apreciáveis. Logo, os estudos de casos apresentados referem-se à essa área.

O evento limitante é caracterizado pela ocorrência de um vazamento de 136kg de UF₆ líquido enriquecido devido ao rompimento de uma tubulação da área de retirada de produto durante o processo de transferência líquida (caso C). Como resultado desse vazamento, parte do produto será vaporizado e o restante solidificará. A fração de UF₆ vaporizada pode ser obtida através do Anexo V /52/ ou por:

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

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)

Para as condições operacionais da planta em estudo, a fração de UF₆ líquido liberado que é vaporizado é de aproximadamente 49%.

Cinco casos acidentais são propostos para a análise desse evento:

- C1 - Rompimento de tubulação na área de retirada de produto e consequente vazamento de 136 kg de UF₆ no próprio local durante 900 s (15 min). Considera-se falha simultânea no sistema de exaustão da área atingida, ou seja, toda a quantidade de UF₆ vaporizado (66,64 kg, correspondendo a 15,14 kg de HF e 45,06 kg de urânio) é liberada, ao nível do solo, para a atmosfera.
- C2 - Rompimento de tubulação na área de retirada de produto e consequente vazamento de 136 kg de UF₆ no próprio local durante 900 s (15 min). Considera-se falha simultânea no sistema de exaustão da área atingida, mas, da quantidade total de UF₆ que é vaporizado (66,64 kg), apenas é liberada, ao nível do solo, para a atmosfera uma parcela do produto que reage com o ar. Admite-se que 20% do HF (3,03 kg) e 50% do urânio (22,53 kg) fiquem confinados no interior da instalação /53/.
- C3 - Rompimento de tubulação na área de retirada de produto e consequente vazamento de 136 kg de UF₆ no próprio local durante 900 s (15 min). Da quantidade total de UF₆ que é vaporizado (66,64 kg), apenas é liberada, ao nível do solo, para a atmosfera uma parcela do produto que reage com o ar, pois considera-se a atuação do sistema de exaustão da área atingida, que opera com filtros HEPA de eficiência na ordem de 85%.
- C4 - Rompimento de tubulação na área de retirada de produto e consequente vazamento de 136 kg de UF₆ no próprio local durante 900 s (15 min). Considera-se falha simultânea no sistema de exaustão da área atingida, ou seja, toda a quantidade de UF₆ vaporizado (66,64 kg, correspondendo a 15,14 kg de HF e 45,06 kg de urânio) é liberada para a atmosfera. No entanto, considera-se o fenômeno de elevação da pluma ("plume-rise") durante a liberação, devido à energia liberada na reação do UF₆ com a umidade do ar. Os valores de Δh calculados pela equação 4.4 são 6,8 m e 15,5 m para as classes D e F, respectivamente, considerando-se a variação das entalpia na reação do UF₆ com a umidade do ar e o tempo de vazamento de 900 s (15min).
- C5 - Rompimento de tubulação na área de retirada de produto e consequente vazamento de 136 kg de UF₆ no próprio local durante 900 s (15 min). Considera-se a atuação dos filtros HEPA presentes no sistema de exaustão da área atingida bem como a ocorrência de liberação a altura elevada via uma chaminé medindo 50 m.

O caso C1 representa uma situação em que não se é dado nenhum crédito ao confinamento exercido pelo próprio prédio, não se considera a atuação dos filtros HEPA do sistema de exaustão, não se contabiliza a elevação da pluma ("plume-rise"), não presume a existência de uma chaminé na instalação e não inclui a deposição de particulados de UO_2F_2 no piso do edifício. A liberação ocorre praticamente a céu aberto.

O caso C2 apresenta condições similares ao caso C1 mas admite que parte do HF e do UO_2F_2 provenientes do vazamento de UF_6 permaneçam retidos nas paredes e no piso do edifício.

O caso C3 difere do caso C1 na hipótese da atuação dos filtros HEPA presentes no sistema de exaustão da área atingida.

O caso C4 é semelhante ao caso C1 mas é considerado o fenômeno de elevação da pluma.

O caso C5 assume condições equivalentes às do caso C3 mas considera a presença de uma chaminé na instalação que possua altura suficiente para classificar esse evento como um caso de liberação a altura elevada.

4.4.7.2 - Consequências das liberações acidentais

Os impactos dos casos propostos são analisados em função da distância ao ponto de liberação, considerando-se duas condições de estabilidade atmosférica: classe D e classe F.

Na avaliação de consequências 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 de propriedade da instalação, onde são analisados os impactos sobre a saúde dos indivíduos do público.

Para a avaliação das consequências externas à instalação (Área 3), admite-se que a distância mínima aos limites de propriedade seja de 300 m.

As análises são realizadas através da aplicação de dois critérios distintos:

- Critério 1: proposto por Hanamann et alli /25/ nas tabelas 3.1 e 3.2 (página 32), onde são avaliadas as consequências toxicológicas e radiológicas sobre a saúde dos trabalhadores (Áreas 1 e 2) e indivíduos do público (Área 3). As tabelas 3.4 (página 33) e 3.6 (página 34) foram utilizadas na AMFE da área de retirada de produto (tabela 4.4.) para a classificação dos impactos sobre o meio ambiente e sobre a operação da planta, respectivamente. Não foram avaliados os impactos devidos a prejuízos financeiros, conforme o critério apresentados na tabela 3.5 (página 34).
- Critério 2: proposto pelo documento NUREG 1391 /6/ na tabela 4.11 (página 99), onde apenas são avaliadas as consequências na área externa à instalação (Área 3). O critério 2 foi complementado pela inclusão da necessidade da adoção de medidas de emergência externas para a proteção de indivíduos do público quando se verificam valores de incorporação de urânio maiores ou iguais a 2.10^{-6} kg.

4.4.7.2.1 - Análise do caso C1

Concentração de HF no ar

Critério 1: Os resultados apresentados na figura 4.17 indicam que as consequências toxicológicas devidas à exposição ao HF são classificadas como:

- crítica (T3), condição atmosférica D, pois a concentração de HF no sítio (Área 2) supera o valor do GRUPO1 ($IDLH = 35.10^{-6}$ kg/m³);
- catastrófica (T4), condição atmosférica F, pois a concentração de HF para indivíduos do público (Área 3) supera o valor do GRUPO1.

Critério 2: Observa-se que, para a classe D, nas proximidades dos limites da propriedade (Área 3), a concentração de HF é inferior ao IDLH, classificando o caso como evento anormal. A condição F é mais crítica, pois observam-se concentrações superiores ao IDLH até a 500 m do ponto de liberação, constituindo acidente.

Incorporação de urânio via inalação

Critério 1: De acordo com a figura 4.18, as consequências toxicológicas devidas a inalação do urânio solúvel são classificadas como:

- crítica (T3), classe D, pois a concentração de urânio para os indivíduos do público (Área 3) supera o valor do GRUPO2 (TLV-C = 1.10^{-6} kg/m³) e no sítio (Área 2) a incorporação de urânio ultrapassa o valor do GRUPO1 (IDLH = 10.10^{-6} kg);
- catastrófica (T4), classe F, pois a incorporação de urânio para os indivíduos do público (Área 3) supera o valor do GRUPO1;

Critério 2: Para a condição D, a incorporação de urânio é inferior a 10.10^{-6} kg e superior a 2.10^{-6} kg a partir de 200 m do local da liberação, caracterizando evento anormal. Na condição F, essa distância atinge 800 m, o que resulta em acidente.

Dose equivalente efetiva

Critério 1: A figura 4.19 mostra que as doses, classes D e F, são inferiores a 0,25 Sv nas adjacências da instalação (Área 2). A 100 m, a dose é cerca de 0,01 Sv e a 400 m atinge o limite anual para indivíduos do público (0,001 Sv), o que caracteriza consequências radiológicas desprezíveis (R1). As doses de radiação por órgão (ossos, rins e pulmões) são insuficientes para causar danos irreversíveis aos mesmos.

4.4.7.2.2: Análise do Caso C2

Concentração de HF no ar

Critério 1: A figura 4.20 mostra que os impactos do caso C2 devidos a exposição ao HF são semelhantes aos do caso C1, classificando-se as consequências como:

- marginal (T2), condição D, pois a concentração de HF para indivíduos do público (Área 3) supera o valor dado pelo GRUPO3 (ERPG1 = $4.1.10^{-6}$ kg/m³), no sítio da instalação (Área 2) ultrapassa o valor dado pelo GRUPO2 (ERPG2 = $16.4.10^{-6}$ kg/m³) e no local do vazamento (Área 1) é maior que o valor do GRUPO1;

- catastrófica (T4), condição F, pois a concentração de HF para indivíduos do público (Área 3) é maior que o valor do GRUPO1.

Critério 2: Para a condição atmosférica D, as concentrações de HF no ar encontram-se abaixo de $35 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ em distâncias superiores a 100 m, determinando a ocorrência de evento anormal. Na condição atmosférica F, os resultados designam acidente, pois as concentrações de HF são inferiores ao IDLH a partir de 400 m do ponto de liberação.

Incorporação de urânio via inalação

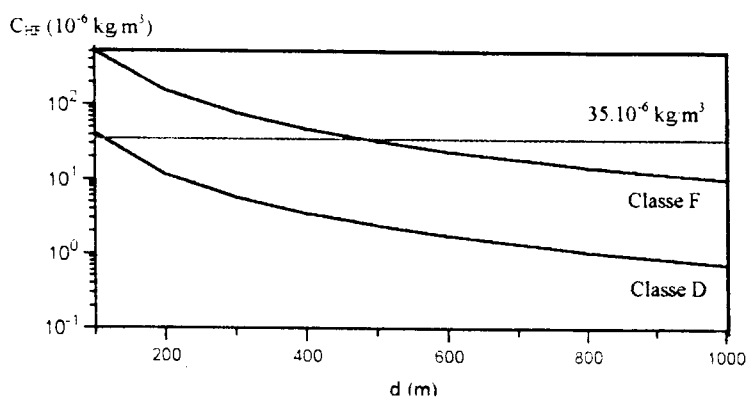
Critério 1: Os resultados apresentados na figura 4.21 mostram que as consequências toxicológicas do caso C2, devidas a inalação de urânio, são similares às observadas no caso C1, classificando-as como:

- crítica (T3), classe de estabilidade atmosférica D, pois a incorporação de urânio para indivíduos do público (Área 3) é maior que o valor dado pelo GRUPO2 e no sítio (Área 2) ultrapassa o valor do GRUPO1;
- catastrófica (T4), classe de estabilidade atmosférica F, pois a incorporação de urânio para indivíduos do público (Área 3) é maior que o valor do GRUPO1.

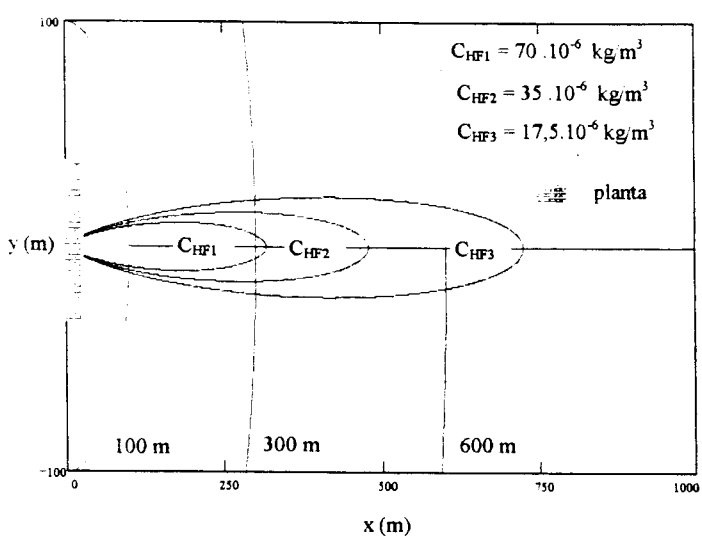
Critério 2: A incorporação de urânio via inalação assume valores inferiores a $10 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$ a partir de 120 m do ponto de liberação (mas superiores a $2 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$ para indivíduos do público), na condição atmosférica D, caracterizando evento anormal. Para a classe F, essa situação ocorre em distâncias superiores a 550 m, caracterizando acidente.

Dose equivalente efetiva

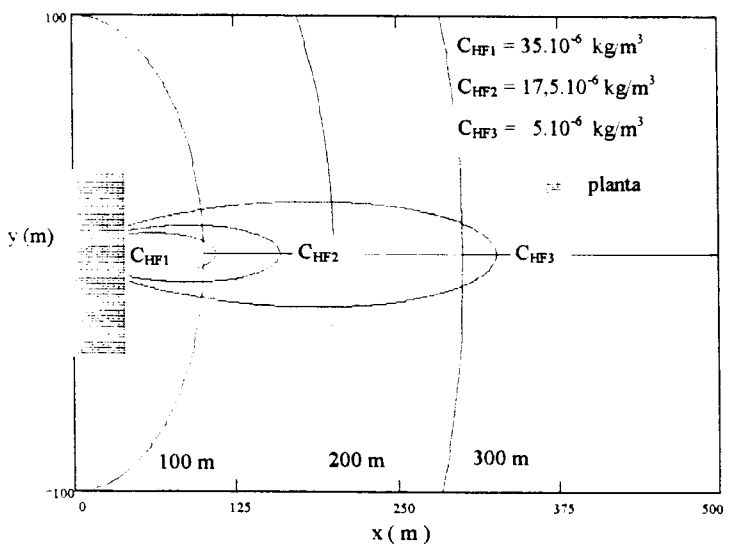
Critério 1: A figura 4.22 mostra que, nas classes de estabilidade atmosférica D e F, as doses de radiação encontram-se abaixo de 0,05 Sv em qualquer distância considerada, ou seja, as consequências radiológicas do caso C2 são desprezíveis (R1). Constata-se que as doses de radiação por órgão (ossos, rins e pulmão) também são desprezíveis.



Concentração de HF ao nível do solo, em função da distância.

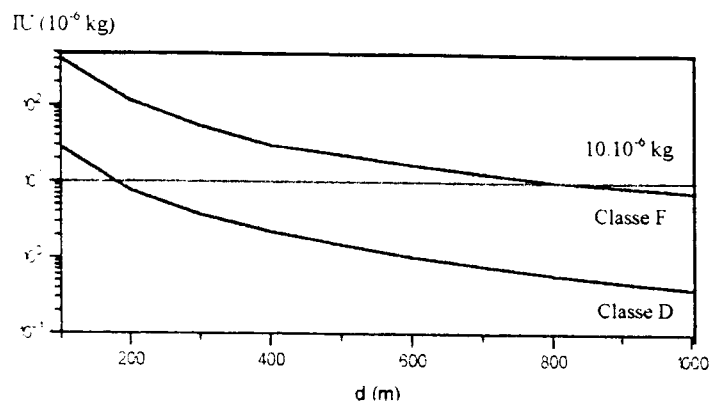


Linhas de Isoconcentração de HF - Classe F

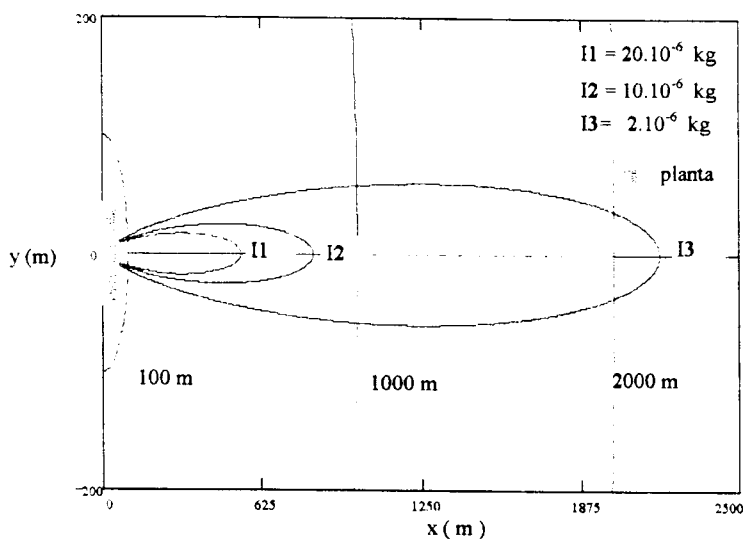


Linhas de isoconcentração de HF - Classe D

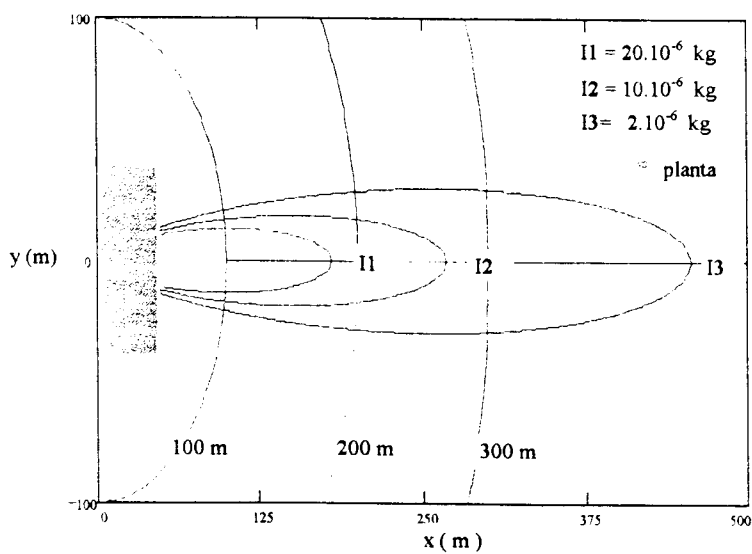
Fig. 4.17: Concentração de HF no ar - Caso C1.



Incorporação de urânio ao nível do solo, em função da distância.

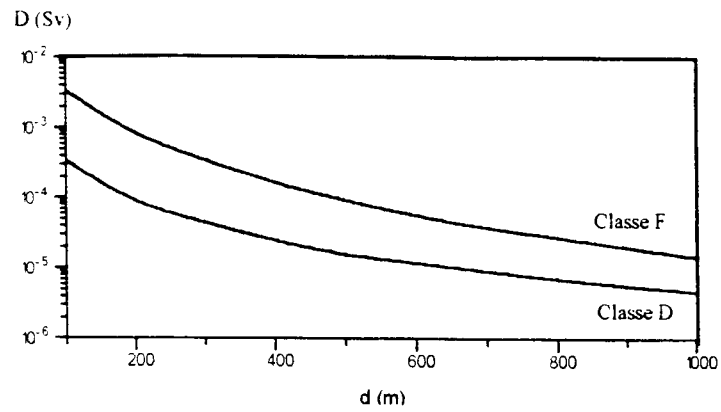


Linhas de isoincorporação de urânio - Classe F

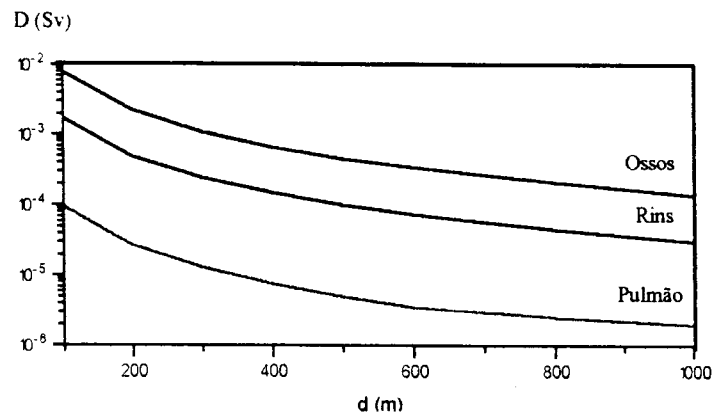


Linhas de isoincorporação de urânio - Classe D

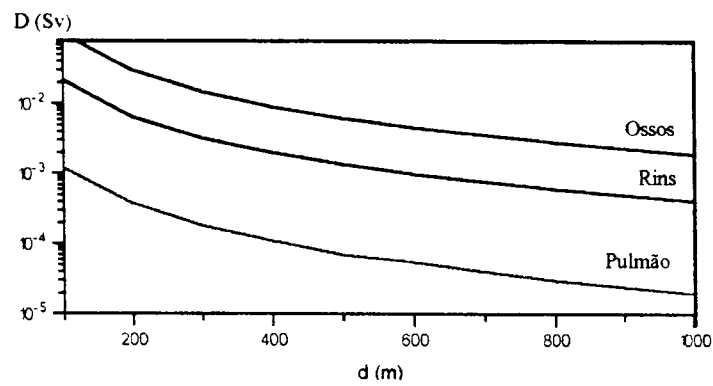
Fig. 4.18: Incorporação de urânio via inalação - Caso C1.



Dose equivalente efetiva ao nível do solo, em função da distância.

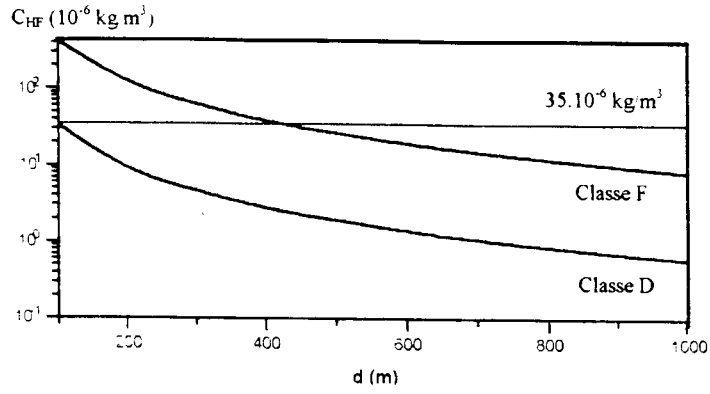


Dose equivalente por órgão ao nível do solo, em função da distância, classe D.

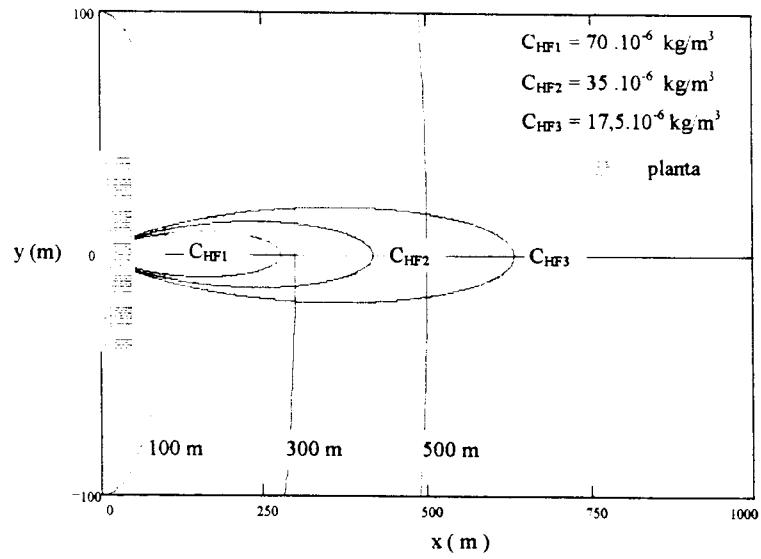


Dose equivalente por órgão ao nível do solo, em função da distância, classe F.

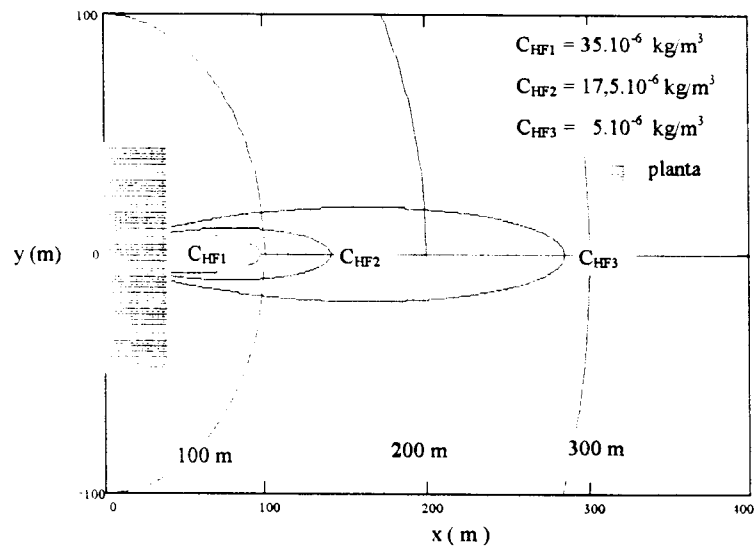
Fig. 4.19: Dose equivalente efetiva e por órgão - Caso C1.



Concentração de HF ao nível do solo, em função da distância.

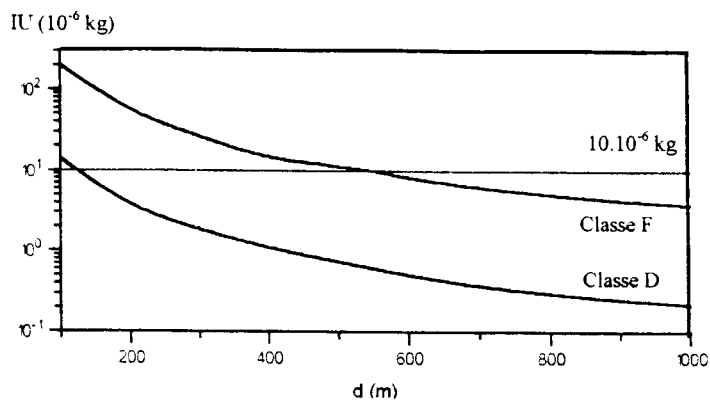


Linhas de isoconcentração de HF - Classe F

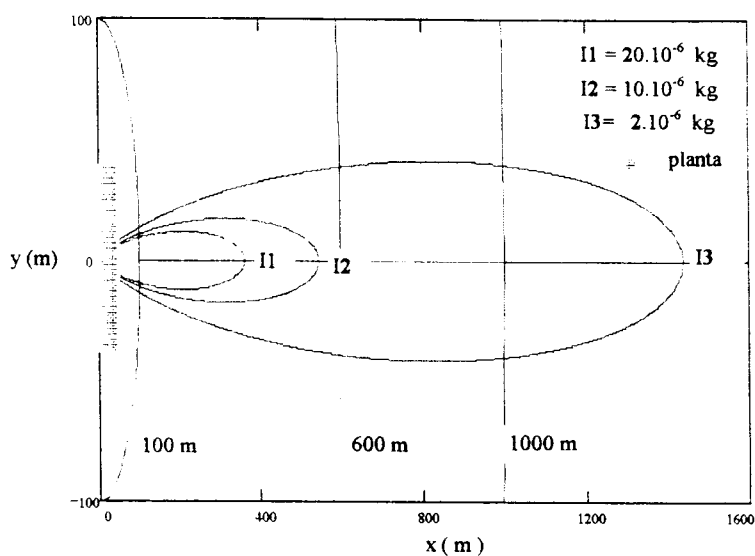


Linhas de isoconcentração de HF - Classe D

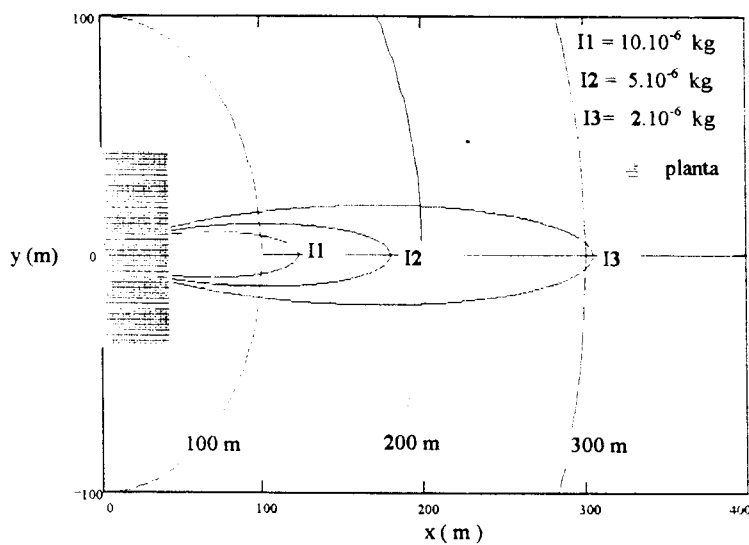
Fig. 4.20: Concentração de HF no ar - Caso C2.



Incorporação de urânio ao nível do solo, em função da distância.

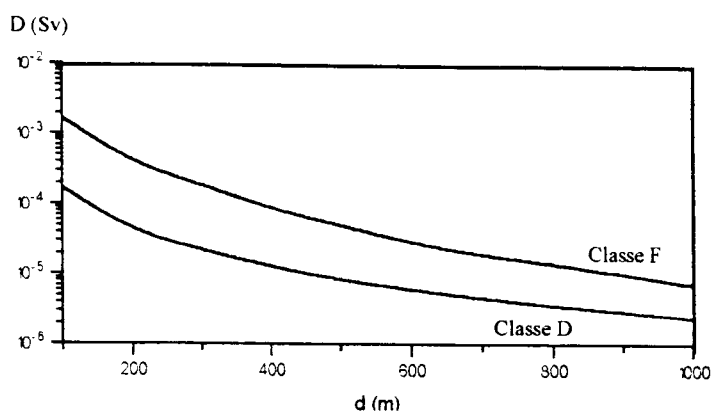


Linhas de isoincorporação de urânio - Classe F

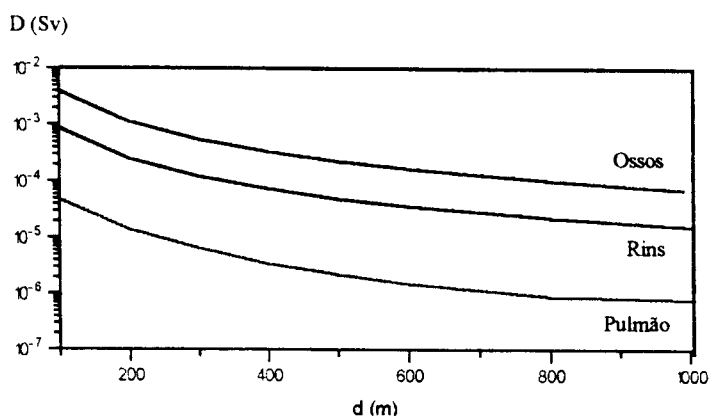


Linhas de isoincorporação de urânio - Classe D

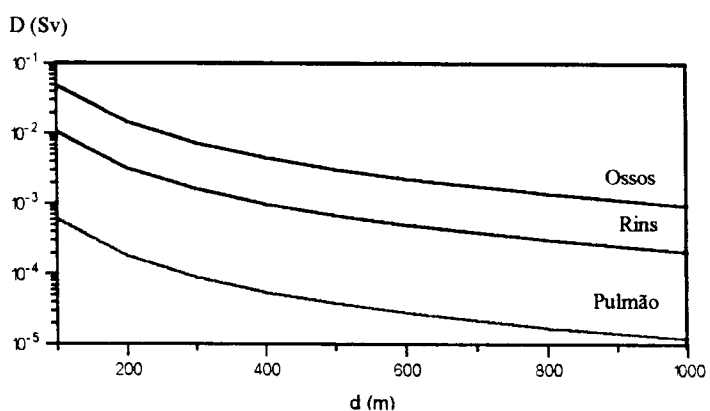
Fig. 4.21: Incorporação de urânio via inalação - Caso C2.



Dose equivalente efetiva, nível do solo, em função da distância.



Dose equivalente por órgão ao nível do solo, em função da distância, classe D.



Dose equivalente por órgão ao nível do solo, em função da distância, classe F.

Fig. 4.22: Dose equivalente efetiva e por órgão - Caso C2.

4.4.7.2.3: Análise do caso C3 (Atuação do sistema de exaustão da área atingida)

No caso C3 considera-se a atuação dos filtros HEPA de 85% de eficiência presentes no sistema de ventilação e exaustão da área de retirada de produto, garantindo-se consequências minimizadas em relação a C1, conforme ilustrado na figura 4.24.

Concentração de HF no ar

Critério 1: As consequências toxicológicas advindas da dispersão do HF no ar são classificadas como:

- marginal (T2), condição atmosférica D, pois a exposição ao HF no local do vazamento (Área 1) é superior ao valor do GRUPO1;
- crítica (T3), condição atmosférica F, pois a exposição ao HF no sítio (Área 2) é superior ao valor do GRUPO1.

Critério 2: Observam-se eventos anormais, considerando-se as classes de estabilidade atmosférica D e F, pois a exposição ao HF fora dos limites de propriedade da instalação (Área 3) é menor que o valor do IDLH.

Incorporação de urânio via inalação

Critério 1: As consequências da incorporação de urânio são classificadas como:

- crítica (T3), classe de estabilidade atmosférica D, pois a incorporação de urânio para indivíduos do público (Área 3) é maior que o valor do GRUPO2;
- crítica (T3), classe de estabilidade atmosférica F pois a incorporação de urânio para indivíduos do público (Área 3) é maior que o valor do GRUPO2 e no sítio (Área 2) supera o valor do GRUPO1;

Critério 2: Os resultados caracterizam evento anormal para a classe F, pois os valores de incorporação de urânio são inferiores ao IDLH e superiores a $2 \cdot 10^{-6}$ kg fora dos limites de propriedade (Área 3). Para a classe D, os resultados indicam não ser necessária a adoção de medidas emergenciais externas.

Dose equivalente efetiva

Critério 1: As doses observadas são inferiores a 0,005 Sv, classes D e F, em todas as distâncias consideradas. Logo, as consequências radiológicas são desprezíveis (R1).

4.4.7.2.4: Análise do Caso C4 (Considerando-se “plume-rise”)

A elevação da pluma devido ao aquecimento gerado pela reação do UF_6 com a umidade do ar é um fenômeno que minimiza os impactos toxicológicos de C1, conforme ilustrado na figura 4.24.

Concentração de HF no ar

Critério 1: As consequências da dispersão do HF no ar são classificadas como:

- marginal (T2), condição de estabilidade atmosférica D, pois a concentração de HF para indivíduos do público (Área 3) supera o valor do GRUPO3 e no local do vazamento (Área 1) é maior que o GRUPO1;
- marginal (T2), condição de estabilidade atmosférica F, pois a concentração de HF para indivíduos do público (Área 3) supera o valor do GRUPO3, no sítio (Área 2) ultrapassa o valor do GRUPO2 e no local do vazamento (Área 1) é maior que o GRUPO1.

Critério 2: Os resultados designam eventos anormais para as classes D e F, pois a exposição ao HF fora dos limites da propriedade (Área 3) é menor que o valor do IDLH.

Incorporação de urânio via inalação

Critério 1: Os valores de incorporação de urânio classificam as consequências como:

- crítica (T3), condição atmosférica D, pois a incorporação de urânio para indivíduos do público (Área 3) ultrapassa o valor do GRUPO2;
- crítica (T3), condição atmosférica F, pois a incorporação de urânio para indivíduos do público (Área 3) ultrapassa o valor do GRUPO2 e no sítio (Área 2) é maior que o valor do GRUPO1.

Critério 2: Verifica-se evento anormal na classe F pois a incorporação de urânio para indivíduos do público (Área 3) é menor que o IDLH e maior que $2 \cdot 10^{-6}$ kg. Para a classe D não é necessária a implementação de ações de emergência externas à instalação.

Dose equivalente efetiva

Critério 1: As doses equivalentes efetivas são inferiores a 0,005 Sv, tanto para a classe de estabilidade D como para a F, em todas as distâncias consideradas. Logo, as consequências radiológicas do caso C5 são desprezíveis (R1).

4.4.7.2.5: Análise do Caso C5 (Medidas atenuadoras de impacto)

O caso C5 ilustra a aplicação de medidas atenuadoras de impactos para minimizar os efeitos da liberação UF_6 . Sugere-se a introdução de uma chaminé de 50 m de altura, para que seja caracterizado um caso de liberação com altura elevada /54/. Considera-se a atuação dos filtros HEPA do sistema de exaustão da área atingida.

Os resultados da figura 4.25 mostram que a presença da chaminé diminui consideravelmente os perigos de liberações de UF_6 , conforme análise a seguir.

Concentração de HF no ar

Critério 1: As consequências da exposição ao HF são classificadas como:

- marginais (T2), para as classes D e F, pois a concentração de HF no ar no local do vazamento (Área 1) supera o valor do GRUPO1.

Critério 2: Os valores de concentração de HF, considerando-se as classes D e F, para indivíduos do público (Área 3) são inferiores ao IDLH, caracterizando eventos anormais.

Incorporação de urânio via inalação

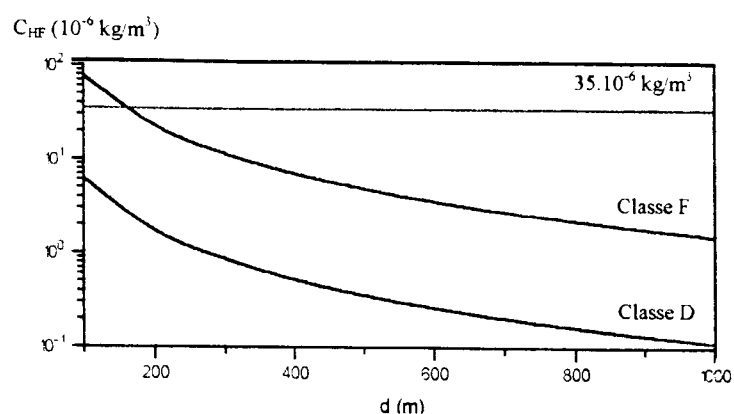
Critério 1: As consequências da inalação do urânio são classificadas como:

- marginais (T2), condições atmosféricas D e F, pois a concentração de urânio no local do vazamento (Área 1) é superior ao valor do IDLH.

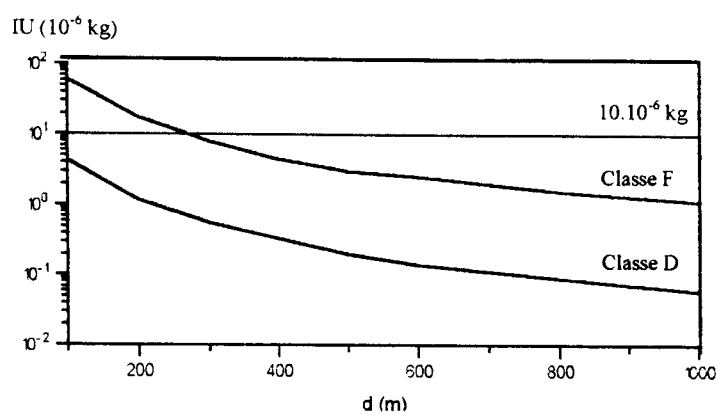
Critério 2: Os valores de incorporação de urânio para indivíduos do público (Área 3) são inferiores a $2 \cdot 10^{-6}$ kg, mostrando não ser necessário o acionamento das medidas de emergência externas.

Dose equivalente efetiva

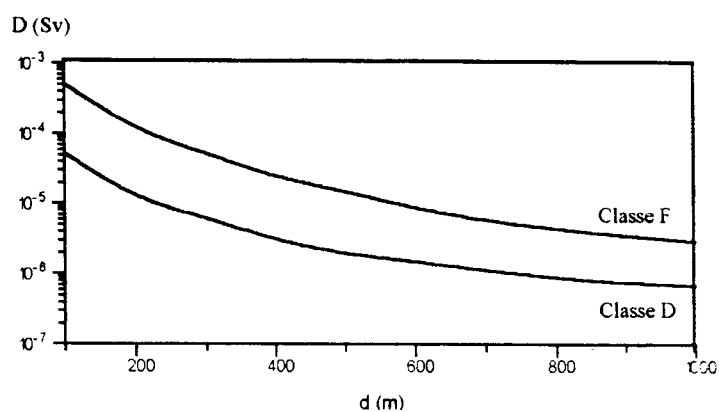
Critério 1: As doses equivalentes efetivas observadas são inferiores ao valor de 0,005 Sv nas classes D e F, classificando as consequências radiológicas como desprezíveis (R1).



Concentração de HF, nível do solo, em função da distância.

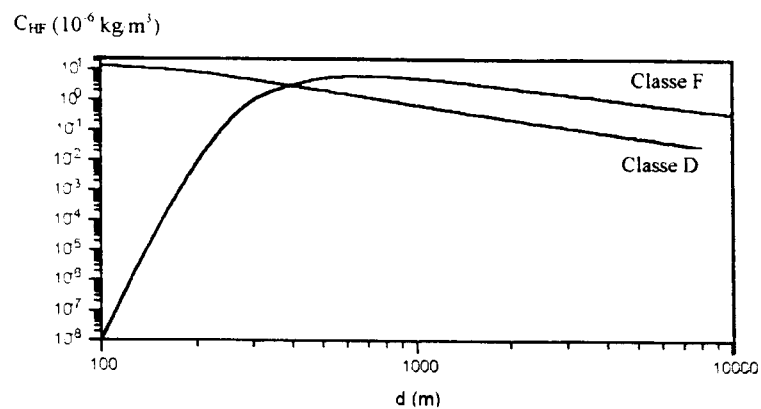


Incorporação de urânio, nível do solo, em função da distância.

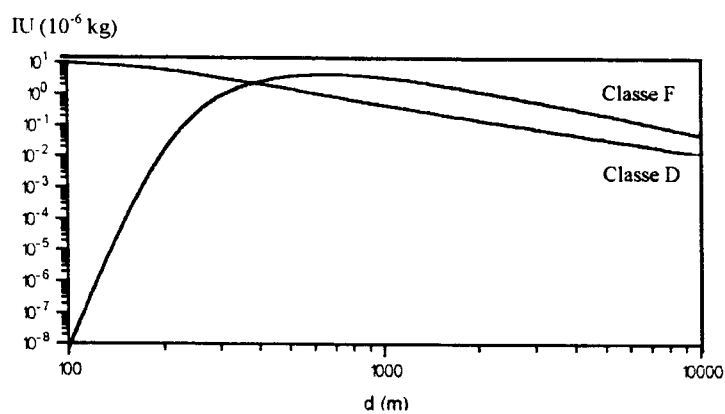


Dose equivalente efetiva, nível do solo, em função da distância.

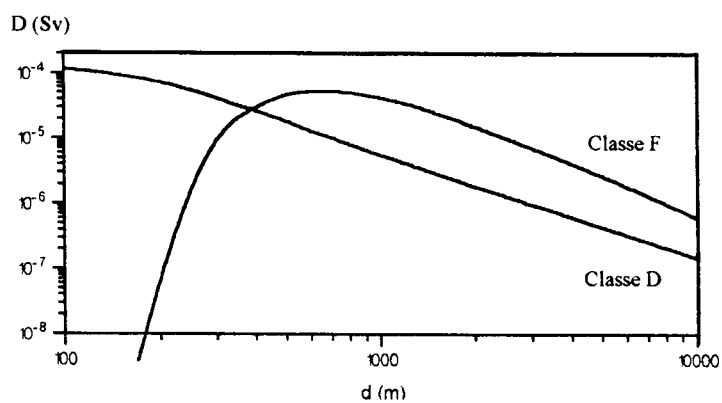
Fig. 4.23: Concentração de HF, Incorporação de urânio e Dose equivalente efetiva, em função da distância - Caso C3.



Concentração de HF ao nível do solo em função da distância.

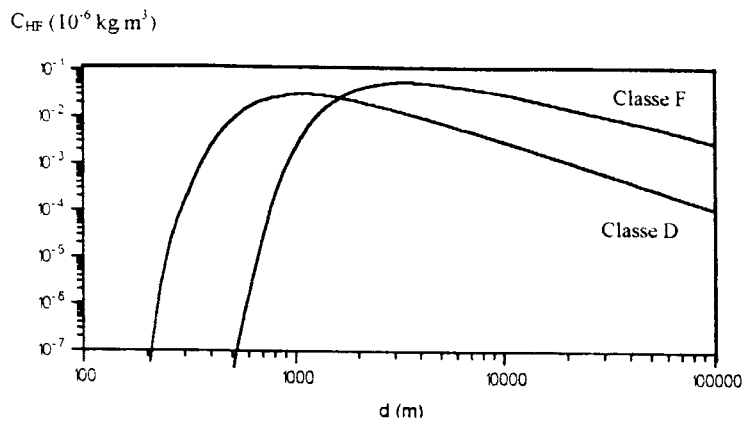


Incorporação de urânio ao nível do solo, em função da distância.

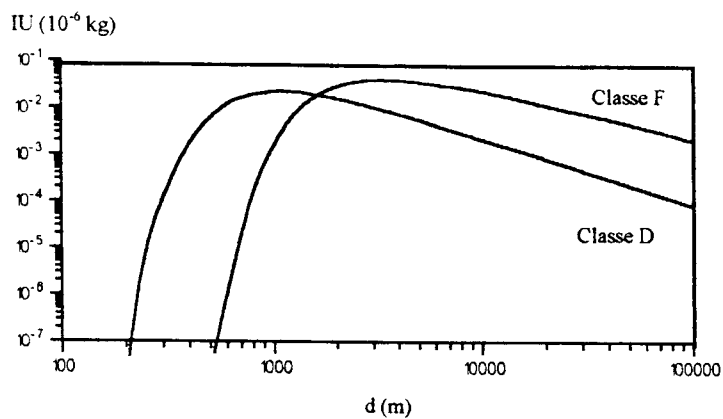


Dose equivalente efetiva ao nível do solo, em função da distância.

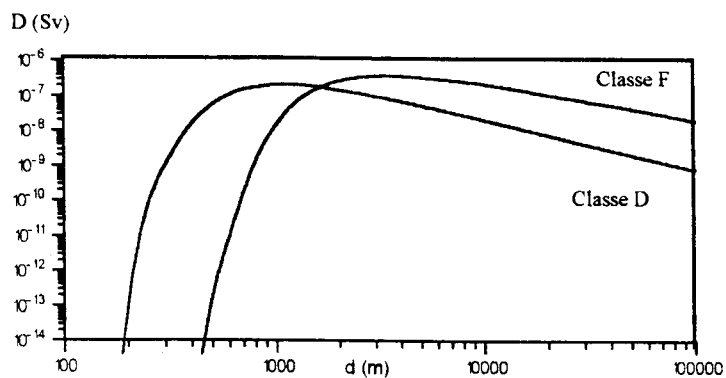
Fig. 4.24: Concentração de HF, Incorporação de urânio e Dose equivalente efetiva, em função da distância - Caso C4.



Concentração de HF ao nível do solo em função da distância.



Incorporação de urânio, nível do solo em função da distância.



Dose equivalente efetiva, nível do solo, em função da distância.

Fig. 4.25: Concentração de HF, Incorporação de urânio e Dose equivalente efetiva, em função da distância - Caso C5.

4.4.7.2.6: Resumo do casos analisados

Os resultados dos casos analisados estão resumidos na tabela 4.12, segundo os critérios 1 e 2 definidos nas tabelas 3.1, 3.2, 3.4, 3.6 e 4.11.

Critério 1

O critério 1 é o mais abrangente na análise dos impactos sobre a saúde humana pois envolve a avaliação de consequências 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 consequências toxicológicas dos casos C1 e C2, considerando-se a classe de estabilidade atmosférica F, são classificadas como catastróficas (T4) pois representam situações em que os indivíduos do público (Área 3) estão submetidos a concentrações ou incorporações superiores aos valores do GRUPO1 (IDLH).

As consequências 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 GRUPO1 (IDLH).

As situações mais críticas entre os casos analisados, em termos de impactos sobre a saúde humana, estão relacionadas aos casos C1 e C2, classe F, conforme mostrado na figura 4.18. Uma forma de se garantir que em nenhuma situação os indivíduos do público venham a sofrer exposições indesejadas (ou seja, concentrações e incorporações superiores ao IDLH na Área 3) seria ampliar os limites de propriedade da instalação para 850 m no mínimo.

Deve-se notar, entretanto, que o caso C1 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 (da ordem de $1 \cdot 10^{-5}/m.h /55/$) e dos filtros (cerca de $1 \cdot 10^{-6} /56/$), além do fato de que os operadores da instalação poderiam atuar para isolar a área afetada pelo vazamento, o caso C1

Nos casos em que a incorporação de urânio atinge o valor de $2 \cdot 10^{-6}$ kg nos limites de propriedade da instalação, seriam indicadas, a princípio, medidas de emergência externas ao sítio. Entretanto, a necessidade efetiva dessas medidas deve vir acompanhada de um estudo detalhado sobre a frequência de ocorrência desses eventos e sobre a possibilidade de implementação de sistemas internos destinados a minimizar as consequências dos vazamentos acidentais de UF_6 líquido.

As situações que são classificadas como acidente correspondem aos casos C1 e C2, classe de estabilidade atmosférica F. Esse resultado mostra que os critérios 1 e 2 são coerentes pois existe equivalência entre a categoria catastrófica do critério 1 e a classificação acidente do critério 2.

Tabela 4.12: Resumo da avaliação de consequências dos casos analisados.

	Caso C1		Caso C2		Caso C3		Caso C4		Caso C5	
	Classe D	Classe F	Classe D	Classe F	Classe D	Classe F	Classe D	Classe F	Classe D	Classe F
Critério 1: Exposição ao HF	CRÍTICA (T3)	CATAS-TRÓFICA (T4)	MARGINAL (T2)	CATAS-TRÓFICA (T4)	MARGINAL (T2)	CRÍTICA (T3)	MARGINAL (T2)	MARGINAL (T2)	MARGINAL (T2)	MARGINAL (T2)
Critério 2: Exposição ao HF	EVENTO ANORMAL	ACIDENTE	EVENTO ANORMAL	ACIDENTE	EVENTO ANORMAL	EVENTO ANORMAL	EVENTO ANORMAL	EVENTO ANORMAL	EVENTO ANORMAL	EVENTO ANORMAL
Critério 1: Incorporação de urânio	CRÍTICA (T3)	CATAS-TRÓFICA (T4)	CRÍTICA (T3)	CATAS-TRÓFICA (T4)	CRÍTICA (T3)	CRÍTICA (T3)	CRÍTICA (T3)	CRÍTICA (T3)	MARGINAL (T2)	MARGINAL (T2)
Critério 2: Incorporação de urânio	EVENTO ANORMAL	ACIDENTE	EVENTO ANORMAL	ACIDENTE	EVENTO ANORMAL	EVENTO ANORMAL	EVENTO ANORMAL	EVENTO ANORMAL	EVENTO ANORMAL	EVENTO ANORMAL
Necessidade de ações de emergência externas	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Critério 1: Exposição à radiação	DESPRE-ZÍVEL (R1)	DESPRE-ZÍVEL (R1)	DESPRE-ZÍVEL (R1)	DESPRE-ZÍVEL (R1)	DESPRE-ZÍVEL (R1)	DESPRE-ZÍVEL (R1)	DESPRE-ZÍVEL (R1)	DESPRE-ZÍVEL (R1)	DESPRE-ZÍVEL (R1)	DESPRE-ZÍVEL (R1)
Critério 1: Impactos sobre o meio ambiente	MARGINAL (A2)									
Critério 1: Impactos sobre a planta	MARGINAL (P2)									

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 - Conclusões

Neste trabalho foi proposto um método para a avaliação de perigos de instalações do ciclo do combustível nuclear. O método foi aplicado a uma planta de enriquecimento isotópico de urânio denominada CPDF.

O método empregado consiste em uma adaptação do método estabelecido pelo Banco Mundial e demonstrou satisfatória aplicabilidade para a avaliação de perigos da CPDF. Foi utilizada também, como ferramenta acessória, a técnica da AMFE, permitindo a classificação de consequências sobre a operação da planta e sobre o meio ambiente.

Através da sistemática aplicada, foi possível identificar o evento mais relevante, e a partir dele, postular cinco casos para análise de consequências sobre a saúde humana.

Quanto ao estudo de caso, conclui-se que:

- 1 - As áreas de maior perigo da CPDF são as áreas de retirada de produto e de retirada de rejeito, pois operam com UF_6 no estado líquido.
- 2 - As barreiras físicas representadas pelo prédio, filtros, tubulações, cilindros e dessublimadores constituem meios eficazes para a contenção de vazamentos de UF_6 . A introdução de uma chaminé a uma altura elevada, construída de forma a garantir que

todo o UF_6 seja liberado pela mesma, é também uma medida eficiente para se minimizar os perigos associados ao vazamento de grandes quantidades de UF_6 .

3 - As consequências das liberações para a atmosfera estão relacionadas com as condições meteorológicas existentes no momento da liberação. Assim, o conhecimento da climatologia local é essencial para uma análise realista. O fator de deposição seca é determinante na fração de urânio (na forma de UO_2F_2) incorporada, pois este apresenta-se como particulado fino. Além disso, haveria a possibilidade de se calcular o fator de deposição úmida, caso fossem conhecidos parâmetros como, por exemplo, a frequência de ocorrência de chuvas em uma região específica.

4 - As doses equivalentes efetivas, mesmo nas proximidades dos limites da propriedade, encontram-se significativamente abaixo do valor de referência de 0,25 Sv, mostrando que o perigo potencial da instalação está na toxicidade química dos produtos de hidrólise do UF_6 .

5 - Verifica-se que, para a situação mais provável (caso C5), as consequências para os indivíduos do público são irrelevantes.

6 - As consequências para os operadores podem ser minimizadas se forem adotados procedimentos operacionais como, por exemplo, o uso de equipamentos de respiração autônoma quando fosse necessário o acesso às áreas de retirada de produto e de rejeito na etapa de transferência líquida de UF_6 .

7 - Com exceção do caso C5, em todos os demais casos ocorrem situações em que a incorporação de urânio supera $2 \cdot 10^{-6}$ kg. Esses resultados indicariam a necessidade de ações de emergência externas à CPDF para a proteção de indivíduos do público. Porém, devem ser analisadas previamente a frequência de ocorrência dos eventos e a possibilidade da implementação de medidas mitigadoras para se verificar a efetiva necessidade dessas ações emergenciais.

5.2 - Recomendações

Como sugestão para trabalhos futuros sobre análise de perigos em instalações do ciclo do combustível nuclear, recomenda-se:

- 1 - Incorporar ao método de análise os perigos associados à criticalidade nuclear, incêndio, explosões, eventos naturais e eventos externos.
- 2 - Avaliar a frequência de ocorrência dos eventos, incluindo os efeitos atenuadores exercidos pelo prédio, pela introdução de uma chaminé e pela atuação de sistemas como o de ventilação e de exaustão entre outros.
- 3 - Desenvolver um modelo específico para simular a liberação de UF_6 na falha de válvulas, tubulações, cilindros e conexões flexíveis, considerando-se o tempo de escoamento, o tipo de liberação (contínua ou discreta) e outros parâmetros.
- 4 - Aplicar o método a outras instalações do ciclo do combustível nuclear, como, por exemplo, plantas de produção de UF_6 onde o processo desenvolvido envolve a utilização de várias substâncias químicas.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB); "Legislação Federal: Controle da Poluição Ambiental"; Fevereiro 1993.
- /2/ Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN); "Licenciamento de Instalações Nucleares"; Norma CNEN-NE-1.04, 1984.
- /3/ Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN); "Proteção Física de Unidades da Área Nuclear"; Norma CNEN-NE-2.01, 1981.
- /4/ Diário Oficial; "Atos do Poder Executivo: Decreto 2210, de 22 de abril de 1997".
- /5/ US Nuclear Regulatory Commission (USNRC); Code of Federal Regulations 10 CFR Part 70; "Domestic Licensing of Special Nuclear Material"; 1988.
- /6/ U. S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC); "Chemical Toxicity of Uranium Hexafluoride Compared to Acute Effects of Radiation "; NUREG 1391, 1991.
- /7/ Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN); "Modelo Padrão para Relatório de Segurança de Usinas de Produção de Hexafluoreto de Urânio Natural"; Norma CNEN-NE-1.11, 1983.
- /8/ Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN); "Modelo Padrão para Relatório de Segurança de Fábricas de Elementos Combustíveis"; Norma CNEN - NE - 1.09, 1980.
- /9/ US Nuclear Regulatory Commission (USNRC); Code of Federal Regulations 10 CFR Part 76; "Regulation of Uranium Enrichment Facilities"; 1988.

- /10/ US Nuclear Regulatory Commission (USNRC); "Safety Evaluation Report for the Claiborne Enrichment Center Homer", Louisiana, 1994.
- /11/ Machado, P. A. L.; "Direito Ambiental Brasileiro"; Revista dos Tribunais; SP 3ª edição; 1991.
- /12/ Secretaria do Meio Ambiente - Governo do Estado de São Paulo; "Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA)"; Série Manuais, ISSN0103-2623, 1994.
- /13/ Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB); "Análise e Avaliação de Riscos - Conceitos Básicos", 1991.
- /14/ Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUM); "Seminário de Análise de Risco de Processos Industriais - Um Enfoque Gerencial" , 1991.
- /15/ National Fire Academy; "The Chemistry of Hazardous Materials", Student Manual, USA, 1983.
- /16/ U. S. Environmental Protection Agency; "Hazardous Materials Incident Response Operations", Student Manual, USA, 1990.
- /17/ Soto, Saad e Fantazzini, "Riscos Químicos", Ministério do Trabalho, Fundacentro, 1995.
- /18/ URENCO Nederland te Almelo v. o. f. "Het Effect Van URENCO Nederland Op Het Milieu", Drienemansweg 1, Almelo, Maart, 1993.
- /19/ Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB); "Propriedades e Riscos Intrínsecos às Substâncias Químicas", outubro 1995.
- /20/ Schieler e Pauze, "Hazardous Materials", Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1976.
- /21/ Meyer, "Chemistry of Hazardous Materials", Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1977.
- /22/ NIOSH; "NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards"; HHS Publication, 1985.

- /23/ American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), "Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1989-1990", Ohio, 1989.
- /24/ American Industrial Hygiene Association (AIHA), "Concepts and Procedures for the Development of Emergency Response Planning Guidelines (ERPGs)", 1989.
- /25/ Hannaman, G. W. , Kryska, P. and Mahan, J. A. "Qualitative Methods for Assessing Risk", ASME, USA, 1995.
- /26/ Department of Energy (DOE), "Safety Analysis and Review System", DOE/AL Supplemental Order 5481.1B, Albuquerque Operations Office, EUA, January, 1988.
- /27/ Department of Energy (DOE), "Method for the Assessment of Worker Safety under Radiological Accident Conditions at Department of Energy Nuclear Facilities", Document #EH-12-94-01, June, 1994c.
- /28/ Brynda, W. J., Lobner, P. R., Powell, R. W. and Straker, E. A. "Division of Operational Environmental Safety", BNL 50831-II, United States Department of Energy, May, 1978.
- /29/ Westinghouse Savannah River Company (WSRC), "Toxic Chemical Hazard Classification and Risk Acceptance Guidelines for Use in DOE Facilities (U)", Document Number WSRC-MS-92-206, December, 1994.
- /30/ Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB); "Programa de Prevenção e Gerenciamento de Riscos no Estado de São Paulo", 1993.
- /31/ Molak, "A Suggested Role for the Society for Risk Analysis in Developing Countries", USA, 1988.
- /32/ Hemenway and Gildersleeve, "What is ISO 14000? - Questions and Answers", CEEM Information Service, USA, 1995.
- /33/ Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB); "Manual de orientação para a elaboração de estudos de análise de riscos"; 1993.

/34/ United Kingdom Atomic Energy Authority; "A Review of Hazard Identification Techniques and Their Application to Major Accident Hazards "; Wigshaw Lane, March 1986.

/35/ Henley, E. J. and Kumamoto, H. ; "Reliability Engineering and Risk Assessment", Prentice Hall, Inc; Englewood Cliffs, NJ 07632, 1981.

/36/ McCormick, N. J. "Reliability and Risk Analysis Methods and Nuclear Power Applications", Academic Press, Inc; London, 1981 .

/37/ WORLD BANK ; "Manual of Industrial Hazards Assessment Techniques"; London, October 1985.

/38/ UCC-ND ENGINEERING; "Preliminary Safety Analysis Report : Centrifuge Plant Demonstration Facility"; Oak Ridge Gaseous Diffusion Plant, Tennessee, USA, K/TS-11872, June 1987.

/39/ Oak Ridge National Laboratory; "Uranium Hexafluoride : A Manual of Good Handling Practices" ; Oak Ridge, TN , USA , ORO-651, October 1991.

/40/ Ministère de L'Industrie - 101, Paris, France.

/41/ Strunck, W. D. and Thorton, S. G. "Uranium Hexafluoride: Safe Handling, Processing and Transportation", Oak Ridge Diffusion Plant, TN, USA, 1988.

/42/ U. S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC); Code of Federal Regulations 10 CFR Part 20 ; "Standards for Protection Against Radiation".

/43/ International Atomic Energy Agency (IAEA); "Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting " ; Safety Guides n. 50 - SG - S3 , Vienna , 1980.

/44/ Lamarsh, A. "Introduction to Nuclear Engineering"; Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1975.

/45/ Eimuts e Konicek, "Atmospheric Environment", vol 6, Pergamon Press, 1972, Great Britain.

- /46/ Thomas, F. , Carpenter, S. and Colbaugh, W. "Plume Rise Estimates for Electric Generating Stations", Air Pollution Control Assoc. , 1970.
- /47/ Kaplan, I. "Nuclear Physics", Department of Nuclear Engineering Massachusetts Institute of Technology, 1972.
- /48/ U. S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC); "Estimates of Internal Dose Equivalent to 22 Target Organs for Radionuclides Occuring in Routine Releases from Nuclear Fuel Cycle Facities", vol 3, NUREG/CR-0150, 1981.
- /49/ "Airborne Uranium, Its Concentration and Toxicity in Uranium Enrichment Facilities"; K/PO/SUB-79; New York; 1979.
- /50/ Marmier, P. and Sheldon E. "Physics of Nuclei and Particles"; vol 1, Academic Press, Inc. ; New York, 1969.
- /51/ Programa computacional CONV-ACI. desenvolvido por Leslie de Molnary, do setor RT do IPEN.
- /52/ Siman-Tov, M. et alli , "Scenarios and Analytical Methods for UF₆ Releases at NRC Licensed Fuel Cycle Facilities", Oak Ridge , TN , USA , NUREG/CR-3139 , June 1984.
- /53/ Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN); "Usina de Enriquecimento de Gronau " ; Descrição Simplificada ; 2. edição ; Tradução de A. C. Camargo.
- /54/ US Nuclear Regulatory Commission (USNRC); " Atmospheric Dispersion Models for Potencial Accident Consequence Assesments at Nuclear Power Plants", 1145, Nov 1992.
- /55/ Rijmond Public Authority; "Risk Analysis of Six Potentially Hazardous Industrial Objects in the Rijmond Area, a Pilot Study", R. Reidel Publishing Company, Holland, USA, UK, 1982.
- /56/ Lees, F. P.; "Loss Prevention in the Process Industries - Hazard Identification, Assessment and Control", Vol 1, Butterworths, Great Britain, 1989.

ANEXO I

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS CILINDROS 30B E 48Y /38/

MODELO DO CILINDRO	DIÂMETRO NOMINAL	MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	VOLUME MÍNIMO	TARA DE PESO	MÁXIMO ENRIQUECIMENTO EM U-235 (% EM PESO)	CAPACIDADE DE UF ₆ *
30B	0,76 m	Aço	736 l	635 kg	5%	2277 kg
48Y	1,22 m	Aço	4041 l	2359 kg	4,5%	12500 kg

* Capacidade baseada na temperatura máxima de 121°C e mínima pureza do UF₆ em 99,5%

ANEXO II

Flutuações horizontal (σ_y) e vertical (σ_z)
(Eimuts e Konicek /44/)

1 - Determinação de σ_y

A flutuação horizontal σ_y é dada por:

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

onde:

K : coeficiente que depende da classe de estabilidade Pasquill, conforme a tabela I.1

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

α : 0.9031

Tabela I.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 expressão que determina σ_z é dada por:

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

onde:

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

Para os 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 I.2: Valores das constantes usadas para se estimar 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
$100 < x < 1000$ m	A	0.0015	1.941	9.27
	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
$x < 100$ 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 III

Fatores de conversão de dose efetiva e por órgão

Tabela II.1: Fatores de conversão de dose efetiva (DCF_e).

	U-234	U-235	U-238
DCF _e (Sv/Bq)	6,75e-7	5,84e-7	5,75e-7

Fonte: NUREG/CR-0150 /47/

Tabela II.2: Fatores de conversão de dose por órgão (DCF_o).

DCF _o (Sv/Bq)	U-234	U-235	U-238
Ossos	2,08e-5	1,86e-5	1,83e-5
Rins	4,30e-6	4,05e-6	4,05e-6
Pulmão	2,54e-7	2,29e-7	2,24e-7

Fonte: NUREG/CR-0150 /47/

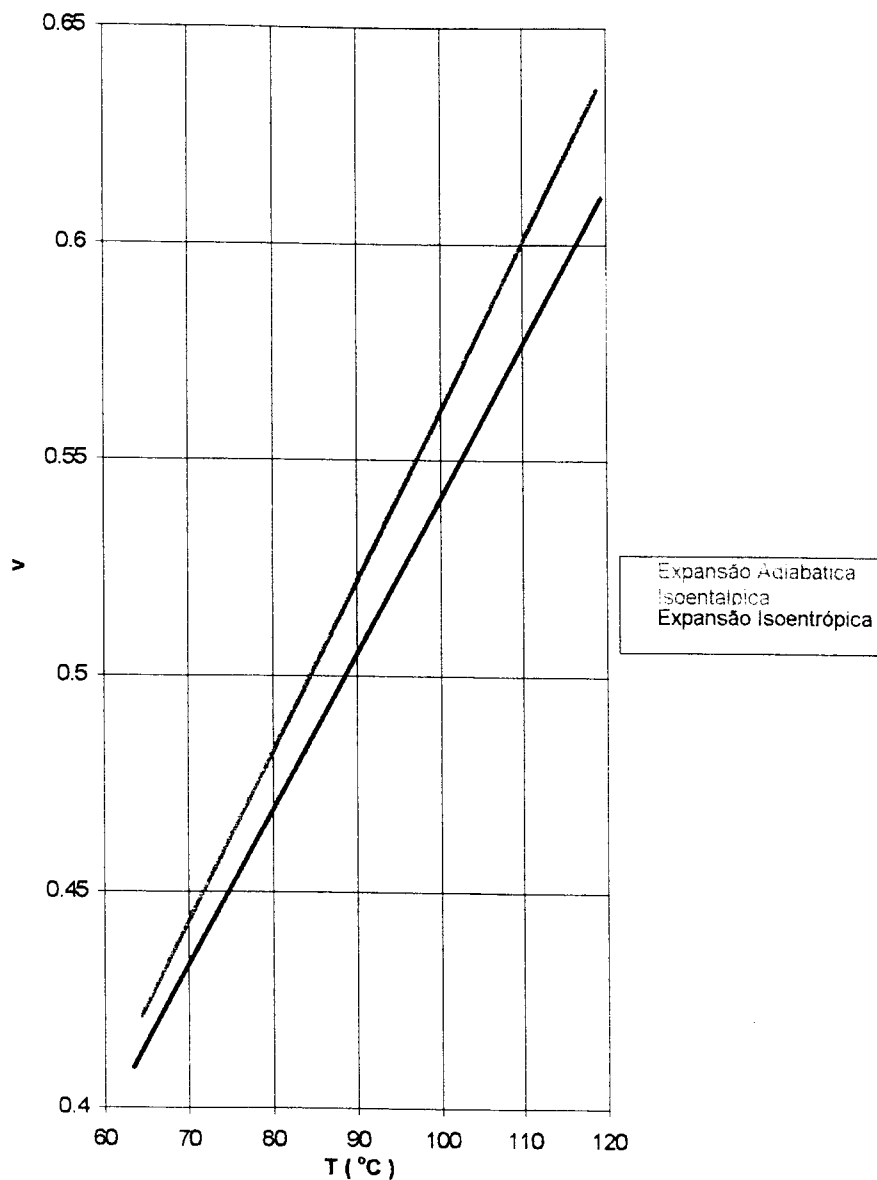
Tabela III.3: Abundância isotópica do urânio.

% de U-235	% de U-234	% de U-238
0,2	0,0009	99,80
0,72	0,0056	99,28
1	0,0081	98,99
2	0,0176	97,98
3	0,0273	96,97
4	0,0369	95,96
5	0,0465	94,95
20	0,1942	79,81
100	0,9687	0,1361

Fonte: /48/

Anexo V

Fração em massa de vapor resultante de uma liberação de UF_6 líquido saturado à pressão atmosférica



Fonte: Siman-Tov, NUREG/CR-3139 /52/