



CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

BR 9432.173

INIS - BR - - 3364

AVALIAÇÃO DAS CONSEQUÊNCIAS RADIOLÓGICAS DE ACIDENTES EM REATORES DE PESQUISA

NELSON LUIZ DIAS FERREIRA

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

181p.

Orientador: Dr. José Messias de Oliveira Neto

**São Paulo
1992**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**AVALIAÇÃO DAS CONSEQUÊNCIAS RADIOLÓGICAS DE
ACIDENTES EM REATORES DE PESQUISA**

NELSON LUIZ DIAS FERREIRA

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

Orientador: Dr. José Messias de Oliveira Neto

São Paulo

1992

Dedico este trabalho:

À minha mãe "Lourdes"

Aos meus irmãos "José Henrique e Ana Lúcia"

Ao meu pai "Nelson" (in memoriam)

Ao meu avô "Álvaro" (in memoriam).

Aos quais serei eternamente grato.

**AVALIAÇÃO DAS CONSEQUÊNCIAS RADIOLÓGICAS DE
ACIDENTES EM REATORES DE PESQUISA**

NELSON LUIZ DIAS FERREIRA

RESUMO

Neste trabalho foram analisadas as consequências radiológicas resultantes de acidentes severos postulados para reatores de pesquisa. Foram considerados um reator do tipo piscina aberta, com 5 MWt de potência, e um reator do tipo PWR, com 50 MWt de potência. Foi avaliada a influência de fatores tais como o termo-fonte, as condições meteorológicas e a distribuição populacional nos resultados obtidos. Avaliou-se ainda a influência exercida pela localização do reator, considerando o mesmo localizado próximo a um grande centro populacional e numa área com características demográficas representativas de uma região rural.

AGRADECIMENTOS

A Coordenadoria para Projetos Especiais (COPESP) do Ministério da Marinha (MM), pelo fornecimento das instalações, equipamentos e suporte financeiro.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN/CNEN-SP), pelo fornecimento das instalações e curso de Pós-Graduação oferecido.

Ao Dr. Gilberto Gomes de Andrade, Chefe do Departamento de Sistemas Nucleares da COPESP, pelo suporte concedido.

Ao Prof. Dr. José Messias de Oliveira Neto, pela valiosa e segura orientação e pela importante contribuição à minha formação profissional.

À amiga Rosane Napolitano Raduan, pela incansável ajuda e fundamental incentivo durante todo o transcorrer deste trabalho.

Ao colega Leslie de Molnary, pela colaboração e incentivo.

Aos colegas Gelson Toshio Otani, Lúcia Estela M. dos Santos Cruz e Edilson Fernandes, da Divisão de Sistemas CDC e IBM da COPESP, pelo apoio e colaboração na utilização dos sistemas computacionais CDC-CYBER e IBM.

Ao Prof. Dr. Wagner de Souza Borges, pelas sugestões e revisão do texto.

Ao colega M. Sc. Alfredo Yuuitiro Abe, pela colaboração na utilização dos programas computacionais ORIGEN2 e CINDER2.

Ao M. Sc. Luís Antônio Terribile de Mattos, Chefe da Seção de Licenciamento da COPESP, pelo fundamental incentivo e companheirismo durante todo

o transcorrer deste trabalho.

Aos colegas de Pós-Graduação: Aldo Siervo do Amorim, Eduardo Oliveira de Assumpção Filho e Marcos Rodrigues Carvalho, pela ajuda e companheirismo durante o curso.

Aos colegas da Seção de Licenciamento da COPESP, Orlando Rodrigues Júnior, Maria Gioconda Pulherini, Silvério Crestana, Custódio Antônio Guimarães, Maria da Penha Sanchez Martins, Peter Franz Woiblet Júnior e Adelaide Cássia Nardocci, pela compreensão durante o desenvolvimento deste trabalho.

As secretárias Sandra Lopes da Silva e Maria Aparecida de Souza Pereira, pela dedicação e solicitude durante o desenvolvimento deste trabalho.

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

**AN ASSESSMENT OF THE RADIOLOGICAL CONSEQUENCES
OF ACCIDENTS IN RESEARCH REACTORS**

NELSON LUIZ DIAS FERREIRA

ABSTRACT

This work analyses the radiological consequences of accidents in two types of research reactors: a 5MWt open pool reactor and a 50 MWt PWR reactor. Two siting cases have been considered: the reactor located near to a large population center and sited in a rural area.

The influence of several factors such as source term, meteorological conditions and population distribution have also been considered in the present analysis.

ÍNDICE

<u>CAPÍTULO 1</u> INTRODUÇÃO		Pág.
1.1	Considerações Gerais	1
1.2	Revisão Bibliográfica	5
1.3	Resumo do Trabalho	9
<u>CAPÍTULO 2</u> ASPECTOS METODOLÓGICOS DA ANÁLISE DE CONSEQUÊNCIAS		
2.1	Introdução	11
2.2	Categorização dos Acidentes	12
2.2.1	Reator BR3	12
2.2.2	Reator IEA-R1	16
2.3	Termo-Fonte	20
2.3.1	Cálculo do Inventário Radioativo	20
2.3.2	Seleção de Radionuclídeos	21
2.3.3	Comentários Gerais	21
2.4	Meteorologia	24
2.4.1	Modelo de Dispersão Atmosférica	25
2.4.1.1	Decaimento Radioativo	28
2.4.1.2	Duração da Liberação	28
2.4.1.3	Altura da Camada de Mistura	29
2.4.1.4	Efeitos de <i>Building-Wake</i>	29
2.4.1.5	Ascensão da Pluma	29
2.4.1.6	Processos de Deposição	31
2.4.1.6.1	Deposição Seca	31
2.4.1.6.2	Deposição Úmida	32
2.5	Distribuição Populacional	33

2.6	Modelo Dosimétrico	34
2.6.1	Exposição Imediata	35
2.6.1.1	Dose Imediata Devida a Passagem da Pluma (Cloudshine)	35
2.6.1.2	Dose Imediata Devida aos Radionuclídeos Depositado Sobre o Solo (Groundshine)	36
2.6.1.3	Dose Imediata Devida a Inalação	37
2.6.2	Exposição Crônica	38
2.6.2.1	Dose Crônica Devida a Contaminação do Solo (Long-Term Groundshine)	38
2.6.2.2	Dose Crônica Devida a Inalação de Radionuclídeos Ressuspensos	40
2.6.2.3	Doses Crônicas Devidas a Ingestão	42
2.7	Efeitos na Saúde do Homem	43
2.7.1	Mortes Imediatas	44
2.7.2	Mortes Devidas a Câncer Latente	46
2.7.2.1	Mortalidade Devida a Exposição Imediata	48
2.7.2.2	Mortalidade Devida a Exposição Crônica	50
2.7.2.3	Órgãos e Fatores de Risco Considerados na Análise	50
2.7.3	Efeitos na Tireóide	52
2.7.4	Observações a Respeito das Incertezas Relacionadas aos Modelos Dosimétrico e de Efeitos na Saúde do Homem	53

CAPÍTULO 3 APLICAÇÃO AO REATOR BR3

3.1	Descrição do Reator	56
3.2	Inventário Radioativo	56
3.3	Definição das Categorias de Acidentes	57
3.4	Meteorologia	60
3.5	Distribuição Populacional	67
3.6	Análise dos Resultados	75
3.6.1	Influência do Termo-Fonte	77

3.6.2	Influência das Condições Meteorológicas	88
3.6.3	Influência da Distribuição Populacional	98
3.6.4	Comparação Entre Acidentes Ocorridos no Sítio do IPEN e Numa Área Rural	108
3.6.5	Comentários Gerais	117

CAPÍTULO 4 APLICAÇÃO AO REATOR IEA-RI

4.1	Descrição do Reator	118
4.2	Inventário Radioativo	118
4.3	Definição das Categorias de Acidentes	119
4.4	Meteorologia	123
4.5	Distribuição Populacional	123
4.6	Análise dos Resultados	123
4.6.1	Influência do Termo-Fonte	124
4.6.2	Influência das Condições Meteorológicas	131
4.6.3	Influência da Distribuição Populacional	137
4.6.4	Comparação Entre Acidentes Ocorridos no Sítio do IPEN e Numa Área Rural	143
4.6.5	Observações à Respeito da Não Consideração das Doses Crônicas Devidas a Ingestão na Previsão das Mortes Devidas a Câncer Latente	149

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1	Conclusões Gerais	150
5.2	Reator BR3	152
5.3	Reator IEA-RI	154
5.4	Recomendações	155

<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	156
-----------------------------------	-----

LISTA DE FIGURAS

Nº	TÍTULO	Pág.
1.1	Fluxograma esquemático dos principais modelos que constituem uma análise de conseqüências.	3
2.1	Comparação entre a distribuição Gaussiana e a distribuição <i>Top-Hat</i> utilizada no CRAC2.	27
2.2	Representação da grade em coordenadas polares utilizada na distribuição populacional.	33
2.3	Esquema simplificado dos modelos que representam os caminhos (modos) de exposição, dos modelos dosimétricos e dos modelos de dose-resposta utilizados na previsão dos efeitos na saúde do homem.	44
2.4	Curvas do critério de dose mortalidade, para a medula óssea, em função do grau de tratamento médico.	47
2.5	Modelo básico utilizado para câncer latente.	48
2.6	Modos de exposição considerados na previsão do número de mortes devidas a câncer latente.	49
3.1	Representação dos intervalos espaciais e dos setores da área considerada na análise.	70
3.2	Representação esquemática das nove distribuições populacionais consideradas na análise.	73
3.3	Valores médios para doses imediatas na medula óssea, em função da distância, condicionais aos termos-fonte SST1 a SST5.	79
3.4	Curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente, condicionais aos termos-fonte SST1 a SST5.	81
3.5	Curvas CCDF para o número de nódulos na tireóide, condicionais aos termos-fonte SST1 a SST5.	83

3.6	Curvas CCDF para o número de mortes imediatas, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte SST1.	91
3.7	Valores médios das doses imediatas na medula óssea, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte SST1.	92
3.8	Curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte SST1.	94
3.9	Curvas CCDF para o número de nódulos na tireóide, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte SST1.	96
3.10	Curvas CCDF para o número de mortes imediatas resultantes das distribuições populacionais POP1, POP2 e POP3, condicionais ao termo-fonte SST1.	100
3.11	Curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9, condicionais ao termo-fonte SST1.	103
3.12	Curvas CCDF para o número de nódulos na tireóide, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9, condicionais ao termo-fonte SST1.	105
3.13	Curvas CCDF para o número de mortes imediatas, resultantes das duas situações de acidentes (sítio do IPEN e área rural), condicionais ao termo-fonte SST1.	110
4.1	Valores médios das doses imediatas na medula óssea, em função da distância, condicionais aos termos-fonte do ABP e do ABER.	127
4.2	Curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente, condicionais aos termos-fonte do ABP e do ABER.	128
4.3	Curvas CCDF para o número de nódulos na tireóide, condicionais aos termos-fonte do ABP e do ABER.	130

4.4	Curvas CCDF para o número de mortes devidas a cancer latente, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte do ABP.	133
4.5	Curvas CCDF para o número de nódulos na tireóide, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte do ABP.	135
4.6	Curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9, condicionais ao termo-fonte do ABP.	139
4.7	Curvas CCDF para o número de nódulos na tireóide, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9, condicionais ao termo-fonte do ABP.	142

LISTA DE TABELAS

Nº	TÍTULO	PAG.
2.1	Radionuclídeos considerados na análise de conseqüências.	22
2.2	Períodos de exposição imediata utilizados na previsão das doses internas imediatas em órgãos específicos.	37
2.3	Radionuclídeos considerados na previsão dos efeitos na saúde resultantes de exposição crônica.	51
2.4	Mortes esperadas devidas a câncer por 10^6 homem.rem, para exposição externa.	52
2.5	Mortes esperadas devidas a câncer por 10^6 homem.rem, para exposição interna.	52
2.6	Fatores de risco utilizados na previsão do número de nódulos na tireóide.	54
3.1	Inventário radioativo do reator BR3.	58
3.2	Resumo das liberações e parâmetros associados, para os termos-fonte SST1 a SST5.	61
3.3	Atividade, em Ci, de cada radionuclídeo, no momento da liberação, para os termos-fonte SST1 a SST5.	62
3.4	Distribuição da freqüência da direção do vento, por ano e por setor, para o período de 1974 a 1983, conforme apresentada no RAS do reator IPEN-MB-01 /47/.	65
3.5	Freqüência média anual da direção do vento por setores considerados na análise.	65
3.6	Distribuição populacional na área com 75 km de raio, ao redor do sítio do IPEN.	71
3.7	Distribuição populacional na área com 75 km de raio,	

	ao redor do sítio do reator, numa região rural.	72
3.8	Valores médios e máximos para o número de mortes imediatas, condicionais aos termos-fonte SST1 a SST5.	77
3.9	Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, condicionais aos termos-fonte SST1 a SST5.	80
3.10	Valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, condicionais aos termos-fonte SST1 a SST5.	82
3.11	Riscos sociais e individuais de mortes imediatas, resultantes dos termos-fonte SST1 a SST5.	84
3.12	Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos termos-fonte SST1 a SST5.	84
3.13	Riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide, resultantes dos termos-fonte SST1 a SST5.	85
3.14	Valores médios para o número de mortes imediatas, o número de mortes devidas a câncer latente e as doses imediatas na medula óssea, condicionais ao termo-fonte SST1 reduzido.	87
3.15	Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes de reduções no termo-fonte SST1.	88
3.16	Valores médios e máximos para o número de mortes imediatas, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte SST1.	90
3.17	Valores médios das doses imediatas na medula óssea, no intervalo espacial 1 (raio = 1,5 km), para os casos onde observou-se a ocorrência de mortes imediatas, condicionais ao termo-fonte SST1.	93
3.18	Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos experimentos	

	MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte SST1.	93
3.19	Valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte SST1.	95
3.20	Riscos sociais e individuais de mortes imediatas resultantes dos experimentos MET1 a MET12.	97
3.21	Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos experimentos MET1 a MET12.	97
3.22	Riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide, resultantes dos experimentos MET1 a MET12.	98
3.23	Valores médios e máximos para o número de mortes imediatas resultantes das distribuições populacionais POP1, POP2 e POP3, condicionais ao termo-fonte SST1.	99
3.24	Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9, condicionais ao termo-fonte SST1.	102
3.25	Valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9, condicionais ao termo-fonte SST1.	104
3.26	Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, para um centro populacional localizado em diferentes distâncias a partir do reator, condicionais ao termo-fonte SST1.	106
3.27	Riscos sociais e individuais de mortes imediatas resultantes das distribuições populacionais POP1, POP2 e POP3.	107
3.28	Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente resultantes das distribuições	

	populacionais POP1 a POP9.	107
3.29	Riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9.	108
3.30	Valores médios e máximos para o número de mortes imediatas resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural, condicionais ao termo-fonte SST1.	109
3.31	Riscos sociais e individuais de mortes imediatas resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural.	111
3.32	Riscos individuais de mortes imediatas devidos a diversas causas.	112
3.33	Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural, condicionais ao termo-fonte SST1.	113
3.34	Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural.	114
3.35	Valores médios e máximos do número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural, condicionais ao termo-fonte SST1.	115
3.36	Riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural.	115
4.1	Inventário radioativo do reator IEA-R1.	120
4.2	Resumo das liberações e parâmetros associados para cada acidente.	124
4.3	Atividades dos radionuclídeos no momento da liberação (em Ci).	125

4.3	Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, condicionais aos termos-fonte do ABP e do ABER.	127
4.5	Valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, condicionais aos termos-fonte do ABP e do ABER.	129
4.6	Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos acidentes ABP - ABER.	130
4.7	Riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide, resultantes dos acidentes ABP e ABER.	131
4.8	Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte do ABP.	132
4.9	Valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte do ABP.	134
4.10	Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos experimentos MET1 a MET12.	136
4.11	Riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide, resultantes dos experimentos MET1 a MET12.	137
4.12	Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9, condicionais ao termo-fonte do ABP.	138
4.13	Valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9, condicionais ao termo-fonte do ABP.	141
4.14	Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes das distribuições	

	populacionais POP1 a POP9.	143
4.15	Riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9.	143
4.16	Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural, condicionais ao termo-fonte do ABP.	145
4.17	Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural.	146
4.18	Valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural, condicionais ao termo-fonte do ABP.	146
4.19	Riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide, resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural.	147
4.20	Valores médios para o número de mortes devidas a câncer latente, considerando-se a ingestão e a não ingestão de alimentos contaminados.	149

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Gerais

Partindo-se do princípio de que as liberações de radionuclídeos para o meio ambiente, provenientes de acidentes nucleares, resultam em efeitos danosos à saúde do homem e ao meio ambiente, existe uma real necessidade de avaliar as possíveis conseqüências resultantes dessas liberações.

O objetivo principal de uma análise de conseqüências é avaliar os impactos adversos sobre a população e o meio ambiente, resultantes de uma liberação accidental de radionuclídeos. Para tanto, são utilizados modelos de dispersão atmosférica, de respostas de emergência, de cálculos de dose, com os correspondentes efeitos na saúde do homem, e de danos à propriedade. Os impactos adversos, normalmente definidos na literatura como "riscos ao público", incluem:

1) Efeitos danosos à saúde do homem

Os efeitos danosos à saúde do homem podem ser avaliados de diversas maneiras:

- mortes que podem ocorrer a curto prazo após a exposição (período de 1 ano, no máximo);
 - doenças que se manifestam dentro do período de 1 ano após a exposição, as quais requerem atenção médica ou tratamento hospitalar, tais como vômitos, fibrose no pulmão, ferimentos na parede do intestino grosso inferior, entre outras;
 - mortes devidas a câncer latente, que ocorrem após longos períodos (da ordem de anos a dezenas de anos);
 - doenças na tireóide, que incluem a ocorrência de nódulos benignos e malignos;
 - alterações genéticas, que só afetam os descendentes da população irradiada (abortos espontâneos, por exemplo).
-

2) Impacto Econômico

A avaliação do impacto econômico resultante da liberação de radionuclídeos, com a conseqüente contaminação do meio ambiente (via terra e água), consiste da previsão dos custos provenientes de medidas tais como a evacuação, relocação, descontaminação do solo e de estruturas, interdição do uso do solo e destruição dos produtos agrícolas.

Segundo Ritchie et alii /1/, a análise de conseqüências pode ser aplicada às seguintes finalidades específicas:

- Avaliação do risco - individual ou coletivo, associado a um sítio genérico ou específico;
- Avaliação de impacto ambiental;
- Fornecer dados para a elaboração de regulamentos e de procedimentos regulamentares;
- Recomendações à respeito da localização do reator;
- Planejamento e resposta de emergência;
- Desenvolvimento de critérios para a aceitabilidade de risco;
- Avaliação de doses.

Na análise de conseqüências são utilizados modelos matemáticos determinísticos e estatísticos que, devida a sua complexidade, são incorporados à programas de computador que simulam a evolução do acidente. O cálculo das conseqüências é feito por meio da integração de modelos que representam o material radioativo imediatamente após a liberação da contenção, modelos de dispersão e transporte atmosférico, modelos dosimétricos, modelos de respostas de emergência e modelos de efeitos na saúde do homem e de danos à propriedade.

Na Figura 1.1, é apresentado um fluxograma esquemático dos principais modelos que constituem as várias fases de uma análise de conseqüências.

Na fase I são consideradas várias seqüências de acidentes, de modo a

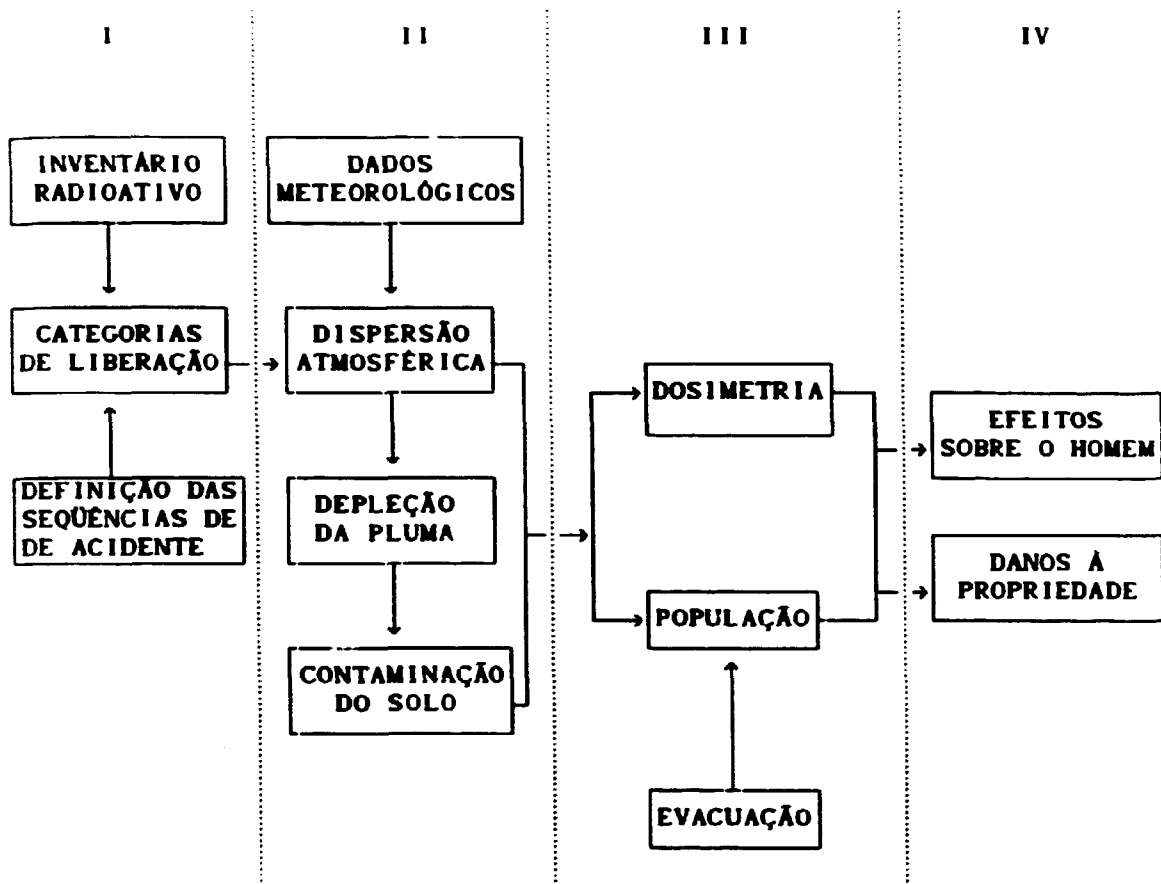


Figura 1.1 Fluxograma esquemático dos principais modelos que constituem uma análise de consequências.

definir o espectro de liberações. As seqüências específicas de acidentes são agrupadas em diferentes categorias de liberação, que são caracterizadas por parâmetros tais como o tempo de liberação, a duração da liberação, a altura da liberação, a energia associada à liberação, a fração do inventário radioativo que será liberada para a atmosfera e a freqüência de ocorrência.

A definição das categorias de liberação possibilita o cálculo da magnitude das liberações radioativas, ou seja, os termos-fonte.

A fase II consiste da avaliação do transporte, da dispersão dos radionuclídeos liberados na atmosfera e da deposição dos mesmos. Dado um

termo-fonte específico, que caracteriza uma liberação, e utilizando-se dados meteorológicos selecionados num sítio específico (velocidade e direção do vento, categoria de estabilidade atmosférica e intensidade de precipitação pluviométrica), são calculadas as concentrações de radionuclídeos na atmosfera e no solo. Durante o transporte da pluma radioativa, os radionuclídeos podem ser removidos da mesma por meio de processos de deposição seca e úmida, os quais contribuem para a contaminação do solo.

Uma vez determinadas as concentrações de radionuclídeos na atmosfera e no solo, em função da distância e do tempo, passa-se à fase III, onde são calculadas as doses individuais e coletivas decorrentes da liberação.

No cálculo das doses são considerados os vários caminhos de exposição que podem afetar a população: exposição externa devida a passagem da pluma; exposição externa devida aos radionuclídeos depositados sobre o solo; exposição interna devida aos radionuclídeos inalados durante a passagem da pluma; exposição interna devida a inalação de radionuclídeos depositados sobre o solo e exposição interna devida a ingestão de radionuclídeos contidos em alimentos contaminados.

As exposições são divididas em duas categorias: exposição imediata (ocorre durante e logo após a passagem da pluma) e exposição crônica (ocorre durante períodos longos).

No cálculo das doses também podem ser consideradas as ações de emergência, que são tomadas visando reduzir as exposições a curto e a longo prazo. A efetividade dessas medidas influirá diretamente na magnitude das doses e, conseqüentemente, na magnitude dos efeitos na saúde do homem.

Uma vez calculadas as doses, para exposições imediata e crônica, passa-se à fase IV, que consiste da previsão das magnitudes dos efeitos danosos à saúde do homem e dos danos de ordem econômica.

Os efeitos na saúde do homem incluem: mortes e doenças imediatas e efeitos

latentes, tais como mortes devidas a câncer latente, efeitos na tireóide e alterações genéticas.

Os efeitos imediatos são calculados com base nas doses individuais, nos critérios de dose-resposta estabelecidos e na distribuição de população considerada. Os efeitos latentes são calculados com base na dose coletiva (homem.Sv) e nos fatores de risco estabelecidos (número esperado de mortes devidas a câncer por milhão de homem.Sv, por exemplo).

São também avaliados os danos à propriedade, por meio do cálculo dos custos provenientes de medidas tais como a evacuação, a descontaminação do solo e de estruturas, a interdição do uso do solo e a destruição de produtos agrícolas.

1.2 Revisão Bibliográfica

Os primeiros estudos à respeito das conseqüências advindas de acidentes envolvendo liberações de radionuclídeos consideravam apenas os reatores de potência.

Em 1957, foi publicado o relatório WASH-740 /2/ que consistia de um estudo onde foram analisados diferentes cenários de acidentes hipotéticos, assim como as conseqüências em termos de efeitos sobre a saúde do homem e danos (de ordem econômica) à propriedade.

Em 1961, no documento 10 CFR Part 100 /3/, foi definido o conceito de Máximo Acidente Crível (MAC), o qual é ainda utilizado para propósitos de seleção de sítio e, particularmente, na determinação das distâncias de segurança (área de exclusão, zona de baixa população e distância do centro de população). Desde então, a filosofia que norteou a maior parte das análises realizadas empregou o conceito do MAC. Contudo, a Inglaterra, confrontada com a necessidade em considerar os reatores localizados próximos a grandes centros populacionais, começou a alterar a vaga idéia de instalações nucleares "seguras" para um estudo quantificado mais realístico do risco ao público. A natureza arbitrária do

critério de segurança determinístico foi inicialmente apontada por Farmer /4/, na Inglaterra, que propôs um novo tipo de avaliação de segurança para reatores, baseado na avaliação das consequências e das suas frequências de ocorrência associadas.

Durante a segunda metade da década de 60 e os primeiros anos da década de 70, nos Estados Unidos, foi estudado o problema em desenvolver técnicas de avaliação probabilística de risco para instalações complexas, tais como reatores de potência.

Em 1975, foi publicado o Reactor Safety Study (RSS) /5/, que, a rigor, constituiu-se na primeira avaliação mais complexa e abrangente das consequências devidas a acidentes potenciais em reatores nucleares de potência, sendo um marco no desenvolvimento e na aplicação de técnicas de avaliação de risco em instalações industriais complexas.

O RSS foi o primeiro estudo a fazer um uso efetivo da combinação das metodologias de árvore de eventos e árvore de falhas, com o objetivo de avaliar os riscos globais associados com a operação de centrais nucleares, aos quais a sociedade está exposta. Além disso, foi também o pioneiro na utilização de modelos matemáticos para a avaliação quantitativa das frequências, dos termos-fonte e das consequências associadas aos acidentes potenciais de reatores.

Como parte do RSS, foi desenvolvido o código computacional CRAC, com o objetivo de simular as consequências em termos de efeitos sobre a saúde do homem e de danos à propriedade, devidas às liberações de material radioativo para a atmosfera, para sítios genéricos.

Conforme foi observado por Ritchie et alii /1/, desde a publicação do RSS foram feitos vários aperfeiçoamentos no campo da análise de consequências. Em 1981, foi desenvolvido o código computacional CRACIT /6/, o qual incluiu modificações nos modelos de dispersão atmosférica e de evacuação, permitindo que características de um sítio específico (terreno, rotas de evacuação, etc...)

fossem consideradas. Em 1983, foi desenvolvido pela United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC), o código computacional CRAC2 /7/, /8/, que é uma versão aperfeiçoada do CRAC, onde foram incorporadas substanciais alterações nas áreas de amostragem de seqüências de eventos meteorológicos e de respostas de emergência.

Ainda nos Estados Unidos, a USNRC, desenvolveu recentemente o código MACCS /9/, o qual incorporou e aperfeiçoou muitos dos modelos utilizados no CRAC2. Além dos modelos americanos citados anteriormente, outros países também têm desenvolvido modelos de análise de conseqüências, podendo ser citados os Sizewell PWR Inquiry, na Inglaterra, e o German Risk Study /10/, na Alemanha.

Os estudos de conseqüências radiológicas concluídos até o presente, estão direcionados, em sua grande maioria, para reatores de potência. Os reatores de pesquisa, por serem em geral de potências menores, não têm sido alvo de estudos mais detalhados. Estes reatores, apesar de apresentarem inventários com ordens de magnitude menores em relação aos reatores de potência, também apresentam riscos quanto a liberação de radionuclídeos para o meio ambiente. Uma maneira na qual poderiam ser avaliados os riscos advindos de acidentes em reatores de pesquisa seria por meio da utilização de técnicas de Avaliação Probabilística de Segurança (APS). Este tipo de avaliação consiste do cálculo das freqüências e das conseqüências associadas com acidentes, por meio da aplicação de modelos probabilísticos, assim como de métodos matemáticos adequados para a avaliação das conseqüências.

Segundo a *International Atomic Energy Agency (IAEA)* /4/, existe a possibilidade de que técnicas de APS utilizadas para reatores de potência venham a ser utilizadas em análises de segurança para reatores de pesquisa. Em vista disso, em 1986 foi publicado o documento IAEA-TECDOC-400 /4/, o qual procura servir como guia para o desenvolvimento de estudos a respeito da aplicação de APS para reatores de pesquisa, sendo que a análise de conseqüências, conforme já foi mencionado, é parte integrante da APS. Em alguns países, como a Áustria, Austrália, Argentina, Tchecoslováquia, Peru, Suíça e Inglaterra já estão sendo

desenvolvidos métodos de aplicação de APS à reatores de pesquisa.

Até o momento, na área mais específica de análise de conseqüências em reatores de pesquisa, destacam-se, na literatura, os trabalhos de Kollas et alii /11/, /12/, de Kollas & Anoussis /13/ e de Rasmussen & Ide /14/.

Nos trabalhos de Kollas et alii /11/ e /12/, foram analisadas as conseqüências resultantes de um LOCA postulado para o *Greek Research Reactor*, na Grécia. Foi considerada a população da cidade de Atenas, que é um grande centro populacional. Foram calculados a dose coletiva e o número esperado de mortes devidas a câncer latente e de efeitos na tireóide. Constatou-se que as mortes devidas a câncer latente apresentaram uma magnitude reduzida, sendo que os nódulos na tireóide foram os efeitos que apresentaram a maior magnitude. Na análise foi utilizada uma versão do código CRAC2.

No trabalho de Kollas & Anoussis /13/, também foram analisadas as conseqüências devidas a acidentes no *Greek Research Reactor*, porém, foi postulado o acidente de bloqueio da entrada de refrigerante no núcleo do reator. Foram calculados os mesmos tipos de conseqüências analisadas nas referências /11/ e /12/, sendo que os resultados obtidos sugerem que este tipo de acidente produziu conseqüências insignificantes.

No trabalho de Rasmussen & Ide /14/, foram avaliadas as conseqüências radiológicas resultantes de um acidente postulado, que consiste do bloqueio do canal de refrigeração no reator *Hoger Onderwijs Reactor* (HOR), na Holanda. O HOR é um reator de pesquisa do tipo piscina, com potência máxima de 3 MWt. Foram calculadas as doses resultantes para várias distâncias a partir do reator. Os resultados mostraram que as doses calculadas, para distâncias além dos limites do sítio, considerando-se a irradiação externa e interna, estão abaixo dos limites de dose e dos níveis de referência de emergência recomendados por organizações holandesas e internacionais.

1.3 Resumo do Trabalho

Neste trabalho foram analisadas as conseqüências resultantes de acidentes postulados para reatores de pesquisa. Dois tipos de reatores foram considerados: o BR3, que é um reator do tipo PWR, com 50 MWt de potência; e o IEA-R1, que é um reator do tipo piscina aberta, assumindo-se que o mesmo opera com 5 MWt de potência.

Foram analisados os seguintes tipos de conseqüências: mortes devidas a exposição imediata; mortes devidas a câncer latente (excluindo a tireóide); e nódulos (benignos e malignos) na tireóide. A previsão das mesmas foi feita por meio da utilização do código computacional CRAC2.

As conseqüências foram analisadas para um conjunto de termos-fonte, com diferentes magnitudes e freqüências de ocorrência associadas; para diferentes condições meteorológicas, que poderiam ocorrer no instante correspondente ao início do acidente e durante todo o transcorrer do mesmo; e para diferentes distribuições populacionais ao redor do sítio, com o que se analisou a influência exercida por estes fatores nos resultados. Foi analisada ainda a influência exercida pela localização do sítio do reator, onde considerou-se duas situações distintas: o reator localizado próximo a um grande centro populacional e o reator localizado numa área com características demográficas típicas de uma região rural.

Convém observar que as medidas de emergência que visam reduzir as exposições a curto prazo, tais como a evacuação e a abrigagem, não foram consideradas no presente trabalho, assim como não foram calculados os danos de ordem econômica.

No capítulo 1 são tecidos comentários gerais a respeito de análise de conseqüências e de seus objetivos e aplicações, assim como são discutidas, sucintamente, as várias fases que constituem a análise. É apresentada também uma revisão bibliográfica dos vários estudos realizados a este respeito.

No capítulo 2 são discutidos os aspectos metodológicos da análise de conseqüências, enfocando os seguintes tópicos: categorização dos acidentes para os dois tipos de reatores considerados; termo-fonte; meteorologia; distribuição populacional; modelo dosimétrico e efeitos na saúde do homem.

Os capítulos 3 e 4 apresentam as análises realizadas com os reatores BR3 e IEA-R1, respectivamente. São apresentadas as descrições dos dois reatores, assim como são descritos os diversos cenários postulados quanto aos termos-fonte, condições meteorológicas e distribuições populacionais. É feita também uma análise dos resultados obtidos.

Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas das análises realizadas, assim como sugestões visando futuros trabalhos.

Capítulo 2

Aspectos Metodológicos da Análise de Conseqüências

2.1 Introdução

Neste capítulo são discutidos, em maiores detalhes, os aspectos metodológicos da análise de conseqüências delineados no capítulo 1.

Na seção 2.2 apresenta-se uma revisão histórica sobre o tratamento dado à categorização de acidentes em reatores nucleares. São apresentados vários cenários representativos de acidentes severos em reatores do tipo PWR, com ênfase nos estudos realizados desde a publicação do RSS. Dentre os cenários apresentados, adotou-se um cenário de acidentes específico que foi aplicado ao reator BR3. São apresentados também os cenários de acidentes adotados para o reator IEA-R1.

Na seção 2.3 é feita uma discussão sobre a determinação do termo-fonte.

Na seção 2.4 faz-se uma discussão do modelo de transporte e dispersão de radionuclídeos na atmosfera, assim como do modelo de deposição dos radionuclídeos liberados. Discute-se também sobre os fatores que alteram os níveis de concentração na atmosfera, tais como o decaimento radioativo, a duração da liberação, a altura da camada de mistura, os processos de deposição seca e úmida, os efeitos de *building-wake* e a ascensão da pluma. Estes modelos são utilizados no código CRAC2.

Na seção 2.5 faz-se uma discussão a respeito da distribuição populacional ao redor do sítio, assim como são apresentados os vários tipos de distribuições considerados na análise.

As fases III e IV da análise de conseqüências (ver Figura 1.1) são discutidas nas seções 2.6 e 2.7, respectivamente, e compreendem uma descrição dos modelos dosimétricos e de efeitos na saúde do homem, incorporados ao programa

CRAC2.

2.2 Categorização dos Acidentes

O espectro de acidentes postulados para um reator está intimamente ligado ao seu tipo, potência e maneira de operação. Assim, categorias muito diferentes de reatores, tais como o BR3 e o IEA-R1, devem ter um tratamento diferenciado com respeito a análise de acidentes.

De maneira geral, os parâmetros que caracterizam uma liberação acidental de material radioativo para o meio ambiente são os seguintes:

- Tempo de Liberação - é o intervalo de tempo entre o início do acidente e a liberação de material radioativo do edifício da contenção para a atmosfera. É usado no cálculo do decaimento inicial de radioatividade;
- Duração da liberação - é o tempo total durante o qual o material radioativo é emitido para atmosfera. Tanto o tempo de liberação quanto a duração da liberação representam o comportamento temporal da liberação no modelo de dispersão;
- A altura de liberação e o conteúdo de energia da pluma afetam a maneira na qual a pluma será dispersa na atmosfera;
- Fração de Liberação - é a fração do inventário do núcleo do reator que será liberada para atmosfera.

2.2.1 Reator BR3

Sendo o BR3 um reator a água pressurizada, decidiu-se adotar, no presente trabalho, uma categorização de acidentes semelhante à utilizada para reatores de potência do mesmo tipo. Esta categorização é descrita mais detalhadamente na seção 3.3.

Do final da década de 50 até a publicação do RSS /5/, em 1975, a filosofia que norteou a análise de acidentes para propósitos de segurança de reatores consistia da postulação de acidentes considerados críveis. Foram definidos os chamados Acidentes Básicos de Projeto (ABPs), que são eventos hipotéticos determinísticos, que representam um modelo para a descrição de acidentes em reatores de potência. Os acidentes que constituem os ABPs foram escolhidos de maneira a representarem as piores condições críveis previstas, constituindo-se numa forma conservativa de descrever as condições de acidentes. O mais severo dentre estes acidentes é o Máximo Acidente Crível (MAC), definido como o acidente postulado que resulta num risco potencial que não é excedido por qualquer outro acidente considerado crível. Di Nunno et alii /15/, em 1962, definiu que o MAC para reatores do tipo PWR consiste do acidente de perda de refrigerante devida a ruptura completa da tubulação do sistema de refrigeração primária, seguida do derretimento do núcleo e da parcial liberação do inventário dos produtos de fissão para o interior do edifício da contenção. Este tipo de acidente, denominado LOCA (*Loss-of-Coolant-Accident*), considera que a integridade da contenção é mantida.

O conceito de MAC, como definido acima, foi empregado para estabelecer critérios de seleção de sítio e na definição de Dispositivos Técnicos de Segurança (*Engineered Safety Features*), em documentos tais como o 10 CFR Part 100 /3/ e o Guia Regulamentar 1.4 /16/.

O RSS, publicado em 1975, foi, a rigor, o primeiro estudo a considerar a utilização de técnicas de avaliação quantitativa para estimar as probabilidades, termos-fonte e conseqüências associadas a acidentes postulados em reatores nucleares. Foram utilizadas técnicas de avaliação de confiabilidade, empregando árvore de eventos e árvore de falhas, de maneira a englobar as seqüências de eventos que podem levar a danos no núcleo e para avaliar as probabilidades associadas a essas seqüências. Além disso, foram desenvolvidos modelos de processos físicos associados com as seqüências, objetivando avaliar as magnitudes e tempos associados à liberação, transporte e deposição dos materiais radioativos do núcleo, através do sistema primário e da contenção para o meio ambiente.

O RSS determina a probabilidade e a magnitude de várias liberações radioativas para a atmosfera. De maneira a definir essas liberações, foram estabelecidas seqüências específicas de acidentes, as quais foram agrupadas em 9 categorias de liberação para PWRs e 5 categorias de liberação para BWRs, desenvolvidas de modo a englobarem os acidentes que envolvem danos no núcleo do reator. Estas seqüências são geralmente caracterizadas pelo "status" do núcleo (derretimento ou não derretimento), integridade da contenção e operacionalidade dos dispositivos técnicos de segurança, tais como borrifadores da contenção, sistemas de remoção de calor e sistemas de refrigeração de emergência do núcleo.

Os acidentes definidos no RSS incluem acidentes severos, com ênfase para os grandes LOCAs, os quais, segundo a USNRC /17/, são dominantes quanto o risco ao público.

A utilização pelo RSS de técnicas probabilísticas permite a avaliação das freqüências dos cenários de acidentes e a determinação dos fatores dominantes de risco. Por outro lado, é importante observar que o RSS apresenta um modelo simplificado, porém eficiente, que adota hipóteses conservativas em áreas de maior complexidade ou na análise de fenômenos não muito bem compreendidos, para a definição das seqüências de acidentes. Em vista disso, o RSS tende a superestimar os resultados, seja na forma de termo-fonte ou de conseqüências.

Em 1981, foi publicado o documento NUREG-0771 /17/, cujo objetivo era o de avaliar as implicações em processos regulamentares e de licenciamento, decorrentes de mudanças nas hipóteses utilizadas na estimativa de termos-fonte. Neste documento, foi definido um espectro de acidentes severos, onde os mesmos foram classificados em cinco grupos distintos, os quais são apresentados a seguir:

Grupo 1 - Dano severo no núcleo (derretimento completo). Todos os dispositivos técnicos de segurança não entram em ação. Falha imediata da contenção. Este acidente é análogo às categorias PWR - 1 a 3 do RSS;

Grupo 2- Dano severo no núcleo. Falhas do sistema de isolamento da contenção. Os sistemas de mitigação da liberação de produtos de fissão (borrifadores e condicionadores de ar da contenção, por exemplo) operam, de modo a reduzir a liberação. Análogo às categorias PWR - 4 e 5 do RSS;

Grupo 3- Dano severo no núcleo. O núcleo derretido atravessa a base de concreto da contenção. Falhas no sistema de refrigeração de emergência. Todos os outros sistemas de mitigação funcionam conforme projetado. É análogo às categorias PWR - 6 e 7 do RSS;

Grupo 4- Dano parcial do núcleo. Sistemas da contenção operam de maneira degradada. A liberação dominante é via atmosfera da contenção. Equivalente ao acidente TMI-2;

Grupo 5- Dano parcial do núcleo. Sistemas da contenção funcionam. O acidente mais severo para este grupo considera que os sistemas da contenção operam conforme o projetado após um substancial derretimento do núcleo. Segundo a referência /17/, este acidente equivale ao ABP utilizado em análises de seleção de sítio (*DBA Siting*), que foi postulado de acordo com o documento 10 CFR 100 /3/.

No espectro de acidentes definido acima, foram caracterizadas várias condições físicas, as quais incluem amplas variações na temperatura, pressão, química do ambiente (oxidante ou redutor) e tempo de vários eventos críticos (derretimento do núcleo, vaporização, etc...).

Com base nestes acidentes, a USNRC /18/ definiu um conjunto de cinco termos-fonte (SST1 a SST5), que foram desenvolvidos de maneira a possibilitar a tomada de decisões em processos de escolha de sítio e planejamento de emergência, os quais encontram-se descritos mais detalhadamente na seção 3.3, uma vez que os mesmos foram aplicados ao reator BR3.

2.2.2 Reator IEA-R1

Para o reator IEA-R1, que é um reator de pesquisa do tipo piscina aberta, que utiliza combustível do tipo MTR (*Materials Testing Reactor*), a postulação dos acidentes foi feita com base em acidentes relatados para outros reatores do mesmo tipo.

Desde a década de 50, vários estudos vêm sendo realizados a respeito da análise de acidentes em reatores de pesquisa, com ênfase nos reatores que utilizam combustível do tipo MTR. A maioria desses estudos avaliam os acidentes baseando-se em critérios determinísticos.

Em 1968, foi publicado o estudo de Binford /19/, onde foram analisadas as conseqüências de acidentes potenciais para o *Oak Ridge Research Reactor* (ORR). O ORR é um reator moderado e refrigerado a água leve e utiliza combustível do tipo placa, que consiste de uma liga de U-Al. Considerou-se uma potência de operação de 45 MWt.

Binford /19/ considerou que a única causa possível de resultar numa liberação significativa de produtos de fissão seria devida a um superaquecimento do combustível, com intensidade suficiente para causar o derretimento e a perda da integridade do encamisamento do combustível. Esse superaquecimento pode resultar de um aumento da potência do reator, da perda da capacidade de refrigeração ou da combinação de ambas as causas. Essas condições, por sua vez, estão condicionadas a duas circunstâncias específicas:

- Ocorrência de acidentes de reatividade, que são situações nas quais é acrescentada reatividade ao reator de maneira não controlada, à uma taxa suficientemente alta, de maneira a elevar a potência do reator a níveis considerados perigosos;
- Ocorrência de acidentes que envolvam a perda de refrigeração do núcleo do reator, causando danos ao mesmo. Segundo Binford /19/, a causa mais provável

para a ocorrência deste tipo de acidente seria devida a um bloqueio do fluxo de refrigerante em um ou mais elementos combustíveis. Contudo, é altamente improvável que mais do que uma pequena fração do núcleo seja danificada. Experiências anteriores mostraram que somente uma pequena fração dos produtos de fissão foi liberada do sistema de refrigeração primário.

Baseado nesses acidentes, Binford /19/ postulou um acidente máximo hipotético para o ORR, com o objetivo de avaliar as consequências resultantes de um acidente considerado muito severo. Para esse acidente, o qual foi considerado não crível, considerou-se que 100% do núcleo do ORR, operando a 45 MWt, seria derretido, resultando na liberação de 100% dos gases nobres e de 50% dos isótopos do iodo. Entretanto, considerou-se que a piscina do reator forneceria um fator de descontaminação igual a 3 para os isótopos do iodo, sendo que a maior parte do iodo permaneceria na água. A liberação de material radioativo para o meio ambiente ocorreria por meio da chaminé do edifício, passando antes pelos filtros, que possuem um fator de descontaminação, para o iodo, igual a 100.

A análise realizada mostrou que, mesmo com o derretimento de 100% do núcleo, a liberação final não resultaria numa contaminação do ambiente externo aos limites do sítio do ORR superior aos níveis definidos no documento 10 CFR 100 /3/.

Em 1969, foi publicado o estudo de Williams et alii /20/, cujo objetivo era realizar uma análise de segurança referente ao *Omega West Reactor* (OWR), localizado no *Los Alamos Scientific Laboratory*, nos Estados Unidos. O OWR é um reator de pesquisa, do tipo tanque, moderado e refrigerado a água leve, e que utiliza elementos combustíveis do tipo MTR.

No referido documento, foram analisados os vários tipos de acidentes possíveis para o OWR, os quais poderiam resultar na liberação de produtos de fissão, que são:

- Acidentes de reatividade;
- Acidentes devidos a falhas nos equipamentos;
- Acidentes devidos a causas externas (sismos, por exemplo);

- Acidentes devidos a perda de refrigeração.

Com relação ao acidente devido a perda de refrigeração, Williams et alii /20/ argumenta que devido o nível de potência relativamente baixo (considerou-se o OWR operando com 8 MWt) e os sistemas de engenharia de segurança projetados, a frequência de ocorrência de um derretimento do combustível, mesmo que parcial, é extremamente baixa.

Uma análise realizada por Webster /21/, que consistiu de testes envolvendo a perda de refrigerante em um reator do tipo LITR (*Low-Intensity Testing Reactor*), tipo tanque, com 3 MWt de potência, verificou experimentalmente que o reator pode ser operado continuamente, a um certo nível de potência, sem resultar no derretimento de qualquer placa de combustível devido ao calor gerado pelo decaimento dos produtos de fissão, mesmo com a perda total de refrigerante. Os dados deste teste e de testes adicionais que utilizaram elementos combustíveis irradiados do ORR indicam que um reator do tipo tanque, com elementos combustíveis do tipo placa, pode ser operado a 3 MWt, por uma semana, e depois sofrer a perda de seu refrigerante, sem que isso acarrete em um superaquecimento das placas de combustível.

No caso do OWR, a análise de Williams et alii /20/ mostra que o derretimento do combustível somente é possível se a água do tanque é drenada, de modo a ficar num nível inferior ao núcleo, durante períodos menores que 30 minutos após a parada do reator. Se o tempo de drenagem for superior a 30 minutos, não deverá ocorrer o derretimento do combustível.

Foi postulada uma pior condição para este tipo de acidente, onde o tanque foi drenado durante 6 minutos após a parada do reator. Desta análise, Williams et alii /20/ concluiu que este acidente pode ser considerado não crítico.

Dos vários tipos de acidentes considerados críticos para o OWR, Williams et alii /20/ considerou que o único acidente com alta frequência de ocorrência que

poderia causar o derretimento do combustível seria aquele resultante do bloqueio da entrada do fluxo de refrigerante no reator, em um ou mais elementos combustíveis. Este tipo de acidente já havia ocorrido anteriormente em pelo menos três reatores similares ao OWR. Uma vez que este acidente possui um potencial de liberação de produtos de fissão maior que para qualquer outro acidente considerado crível, o mesmo foi adotado como sendo o Máximo Acidente Crível para o OWR.

No MAC definido para o OWR, foram adotadas as seguintes condições /20/:

- 1) Sete elementos combustíveis foram afetados devido o bloqueio do fluxo de refrigerante;
- 2) 50 % de cada elemento combustível foi derretido;
- 3) Os elementos combustíveis derretidos continham 12 % do inventário total do núcleo;
- 4) 12 % dos gases nobres e 0,6 % dos isótopos do iodo contidos no inventário do núcleo foram liberados para a atmosfera.

A exemplo do OWR, foram realizadas recentemente outras análises envolvendo reatores de pesquisa que utilizam combustíveis do tipo MTR, tais como os estudos de Rasmussem & Ide /14/ e de Kollas & Anoussis /13/. Nestes estudos observou-se a tendência em considerar o acidente que consiste do bloqueio da entrada do fluxo de refrigerante no reator como sendo o acidente crível mais sério.

Com relação ao reator IEA-R1, no presente trabalho foram postulados dois tipos de acidentes:

- Acidente com perda de refrigerante (LOCA), acompanhado do derretimento parcial do núcleo do reator;
- Acidente envolvendo o bloqueio da entrada de refrigerante em um ou mais elementos combustíveis.

Uma descrição mais detalhada a respeito dos acidentes postulados para o reator IEA-R1 é feita na seção 4.3.

2.3 Termo-Fonte

Na análise de conseqüências, um dos parâmetros mais importantes, senão o mais importante, é a magnitude da liberação radioativa para o meio ambiente, assim como o comportamento dessa liberação em função do tempo. Este parâmetro é definido como termo-fonte.

Para a determinação do termo-fonte, é essencial que seja conhecido o inventário dos radionuclídeos presentes no núcleo do reator, no instante correspondente ao início de um acidente.

2.3.1 Cálculo do Inventário Radioativo

Os procedimentos para o cálculo dos inventários radioativos dos reatores BR3 e IEA-R1 são semelhantes e têm como base as características do projeto de cada núcleo, bem como o histórico de operações de cada reator.

Para o reator BR3, o inventário radioativo foi calculado com o código ORIGEN2 /22/, o qual possui uma biblioteca com dados de seção de choque, em um grupo de energia, relativos a reatores do tipo PWR. São feitos cálculos de transmutação de radionuclídeos para uma certa queima do combustível. A esta queima está associada uma determinada radioatividade, da qual determina-se a atividade de cada radionuclídeo. Na seção 3.2 são apresentadas, mais detalhadamente, as hipóteses utilizadas no cálculo.

Para o reator IEA-R1, foi utilizado o código CINDER2 /23/, o qual apresenta uma biblioteca de seções de choque relativas a reatores do tipo PWR. Em vista disso, de maneira a utilizar dados que refletissem condições mais realísticas relativas a um reator do tipo piscina aberta, foi executado um cálculo celular com o código HAMMER-TECHNION, com queima, afim de produzir um arquivo de seções de choque, em quatro grupos de energia, dos produtos de fissão e transurânicos presentes no reator. Na seção 4.2 são apresentadas, mais

detalhadamente, as hipóteses utilizadas no cálculo do inventário.

2.3.2 Seleção dos Radionuclídeos

No cálculo do inventário radioativo, tanto pelo ORIGEN2 quanto pelo CINDER2, são consideradas centenas de radionuclídeos, entre produtos de ativação, produtos de fissão e transurânicos.

Visando selecionar os radionuclídeos, de maneira que a eliminação de parte deles não afete significativamente os resultados dos cálculos de doses, foi utilizado o critério estabelecido no RSS, que considera fatores tais como a quantidade (em Ci), fração de liberação, tipo e energia da radiação emitida, características químicas e meia-vida radioativa. A aplicação deste critério permitiu a eliminação de muitos radionuclídeos com meias-vidas menores que 25,7 minutos, uma vez que, segundo o RSS, o intervalo de tempo mínimo entre o início do acidente e a liberação de radionuclídeos para a atmosfera leva de 0,5 a 30 horas (para reatores LWR). Esta eliminação resultou na seleção de 54 radionuclídeos biologicamente significativos. De acordo com o RSS, o I, o Cs, o Te e o Ru são os responsáveis pela maior parte das consequências resultantes em acidentes. Na Tabela 2.1 encontram-se listados os 54 radionuclídeos considerados na análise.

Os radionuclídeos selecionados foram agrupados em classes, de acordo com suas propriedades físicas e químicas semelhantes. As classes de radionuclídeos são as seguintes: gases nobres (Kr, Xe); iodo elementar e orgânico; metais alcalinos (Cs e Rb); terras raras (Ba, Sr); grupo dos metais nobres (Ru, Rh, Co, Mo, Tc) e óxidos refratários (La, Zr, Nb, Ce, Pr, Nd, Np, Pu, Am, Cm).

2.3.3 Comentários Gerais

Os modelos utilizados em análises de acidentes, como no RSS, no *Limerick Probabilistic Risk Assessment* /24/, no *Zion Probabilistic Risk Assessment* /25/ e na referência /17/, tentam representar os processos físicos associados com os

Tabela 2.1 Radionuclídeos considerados na análise de conseqüências.

Elemento	Radionuclídeo
Cobalto	Co-58, Co-60
Criptônio	Kr-85, Kr-85m, Kr-87, Kr-88
Rubídio	Rb-86
Estrôncio	Sr-89, Sr-90, Sr-91
Ítrio	Y-90, Y-91
Zircônio	Zr-95, Zr-97
Nióbio	Nb-95
Molibdênio	Mo-99
Tecnécio	Tc-99m
Rutênio	Ru-103, Ru-105, Ru-106
Ródio	Rh-105
Telúrio	Te-127, Te-127m, Te-129, Te-129m, Te-131m, Te-132
Antimônio	Sb-127, Sb-129
Iodo	I-131, I-132, I-133, I-134, I-135
Xenônio	Xe-133, Xe-135
Césio	Cs-134, Cs-136, Cs-137
Bário	Ba-140
Lantânio	La-140
Cério	Ce-141, Ce-143, Ce-144
Praseodímio	Pr-143
Neodímio	Nd-147
Neptúnio	Np-239
Plutônio	Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241
Americío	Am-241
Cúrio	Cm-242, Cm-244

eventos que são esperados ocorrer durante um acidente. Estas análises apresentam uma limitação quanto a determinação de termos-fonte, uma vez que seria requerida uma clara e completa compreensão dos processos envolvidos num acidente. Durante um acidente real, a seqüência de eventos, e mesmo o "status" de sistemas importantes da instalação, não são completamente compreendidos, implicando na dificuldade em determinar-se os termos-fonte com base nas frações de liberação definidas por estas análises, o que, por sua vez, leva a grandes incertezas.

Hoje em dia existem grandes controvérsias a respeito da magnitude e da natureza dos termos-fonte para acidentes severos. No estudo realizado por Levenson & Rahn /26/ e no "German Risk Study" /10/, posteriores à emissão do RSS, foi

sugerido que os termos-fonte utilizados no RSS, para avaliar as conseqüências devidas a acidentes, foram superestimados. Embora para vários casos analisados essa afirmativa se confirmasse, o estudo realizado por Giseke et alii /27/ conclui que não é possível fazer a generalização de que os termos-fonte serão menores que os gerados no RSS para todos os casos.

Conforme é observado em documento emitido pela *Nuclear Energy Agency* (NEA) /28/, os vários estudos realizados indicam que as incertezas em prever-se os valores dos termos-fonte dependem de instalações e seqüências específicas, e, particularmente, do tempo decorrido desde o início do acidente até o instante em que a contenção falha. Em particular, o estudo realizado por Levenson & Rahn /26/ evidencia que determinados processos físicos e químicos, os quais podem ocorrer no sistema de refrigeração primário e na contenção, podem levar a uma diminuição do material liberado seguindo-se à ocorrência de um acidente, resultando em quantidades substancialmente menores que aquelas normalmente consideradas. Estes processos incluem o *plate-out* de vapores aquecidos, a aglomeração e a deposição de aerossóis e a dissolução de materiais solúveis na água, e foram estudados no relatório NUREG-0772 /29/.

Além destes mencionados, outros estudos estão sendo realizados para um melhor conhecimento desses processos, com o propósito de confirmar-se que a solubilidade de produtos de fissão voláteis e os mecanismos de remoção de aerossóis podem limitar a quantidade de radionuclídeos liberados para níveis com ordens de magnitude menores que os normalmente considerados.

Um estudo realizado por Giseke et alii /30/ apresenta a descrição do sistema de códigos STCP (*Source Term Code Package*), o qual analisa situações de acidentes, de maneira a fornecer previsões mais realísticas de termos-fonte. Nos diversos códigos que compoem o STCP estão incorporados mecanismos que realizam cálculos que abrangem princípios físicos, químicos e de engenharia.

Um dos códigos que compoem o STCP, o MARCH3, analisa a resposta termo-hidráulica do núcleo do reator, do sistema de refrigeração primário e dos

sistemas da contenção em reatores LWR, em resposta a acidentes que envolvam algum nível de não operacionalidade de dispositivos técnicos de segurança. Em suma, a utilização do STCP produz valores de termos-fonte menos conservativos que os calculados com os modelos propostos pelo RSS.

Mais recentemente, a USNRC desenvolveu o código MELCOR /31/, que modela a progressão de acidentes severos em reatores a água leve pressurizada. Este código foi desenvolvido como uma ferramenta de segunda geração, com o objetivo de substituir o STCP. No MELCOR, todo o espectro de fenômenos envolvendo acidentes severos, desde a termo-hidráulica do sistema primário e da contenção, aquecimento, degradação e relocação do núcleo e ainda o transporte e a liberação de produtos de fissão é tratado de modo unificado.

Além dos códigos já citados, é oportuno mencionar o código MAAP /32/, desenvolvido pela *Fauske and Associates, Inc.*, que é utilizado como ferramenta da indústria para análise de acidentes severos em reatores BWR e PWR.

O MAAP contém modelos para os sistemas termo-hidráulicos do primário; aquecimento, degradação e derretimento do núcleo; liberação, transporte, deposição e aquecimento de produtos de fissão; termodinâmica da contenção; Sistemas de Engenharia de Segurança, entre outros, que são utilizados de maneira integrada. Estes modelos podem, eventualmente, ser incorporados em alterações a serem processadas nos códigos presentes no STCP, com o objetivo de aprimorar os seus resultados.

2.4 Meteorologia

O primeiro passo da seqüência dos cálculos que constituem a análise de conseqüências consiste da avaliação do transporte atmosférico, da dispersão e da deposição dos radionuclídeos liberados. De maneira que os processos de transporte e de dispersão atmosférica representem situações realísticas, com base nas condições meteorológicas existentes no início do acidente e durante todo o seu transcorrer, é necessário que sejam utilizados dados meteorológicos selecionados

do próprio sítio em questão. Esses dados consistem, basicamente, das seguintes informações: velocidade e direção do vento, categoria de estabilidade atmosférica e intensidade de precipitação pluviométrica. Assume-se que a direção do vento mantém-se inalterada durante e após a liberação.

Segundo o estudo de Sprung /33/, mesmo que dados como a velocidade do vento, categoria de estabilidade atmosférica e intensidade de precipitação para um determinado sítio não se encontrem disponíveis, ainda assim poderá ser feita uma estimativa de risco adequada pela simples substituição dos mesmos por dados de um outro sítio que possua topografia e meteorologia similares ao sítio considerado inicialmente.

Na presente análise, considera-se que as condições meteorológicas definidas para o instante correspondente ao início do acidente mantêm-se inalteradas durante todo o transcorrer do mesmo.

2.4.1 Modelo de Dispersão Atmosférica

O modelo de dispersão atmosférica incorporado ao CRAC2 é o Gaussiano. A concentração integrada no tempo, ao nível do solo, é calculada utilizando-se a seguinte equação:

$$\chi(x,y,0) = \frac{Q}{\pi \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot \bar{u}} \exp \left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2(x)} + \frac{-h^2}{2\sigma_z^2(x)} \right) \quad (1)$$

onde:

$\chi(x,y,0)$ = concentração integrada no tempo, ao nível do solo (Cl.s/m³);

Q = quantidade total liberada (Cl);

h = altura da liberação (m);

x = distância na direção do vento (m);

y = largura da pluma (na direção perpendicular ao campo de vento) (m);

$\sigma_y(x)$ = desvio padrão horizontal da pluma (m);

$\sigma_z(x)$ = desvio padrão vertical da pluma (m);

\bar{u} = velocidade média do vento (m/s).

Na equação (1) é feita uma simplificação onde o espalhamento lateral da pluma Gaussiana é substituído por uma função retangular, conhecida por *top-hat distribution* (ver Figura 2.1), com largura igual a $3\sigma_y$, onde o termo

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_y(x)} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right)$$

da equação (1) é substituído por $1/3\sigma_y(x)$, resultando na seguinte equação:

$$\chi(x,0) = \frac{Q}{(3/2) \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot \bar{u}} \exp\left(\frac{-h^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) \quad (2)$$

A concentração integrada no tempo, para cada radionuclídeo, é calculada para cada intervalo espacial, no ponto equidistante entre o raio interno e o raio externo do intervalo, que neste estudo foi denominado de ponto central do intervalo.

Os valores de $\sigma_y(x)$ e $\sigma_z(x)$ são calculados para cada intervalo espacial, utilizando-se as curvas de Pasquill-Gifford, publicadas na referência /34/. A parametrização de $\sigma_y(x)$ e $\sigma_z(x)$ é feita utilizando-se o esquema desenvolvido por Martin & Tikvart /8/ e descrito por Eimutis & Konicek /35/. O CRAC2 incorporou uma modificação do parâmetro de dispersão vertical (σ_z), de maneira a levar em conta a rugosidade da superfície do terreno.

Segundo Ritchie et alii /8/, as curvas de Pasquill-Gifford são apropriadas para rugosidades de superfície de, aproximadamente, 3 cm (gramado). Por outro lado, de modo a refletir valores típicos dos Estados Unidos, o CRAC2 considera que a rugosidade de superfície é de 10 cm (plantação, arbustos, etc...), sendo que a parametrização de σ_z inclui a seguinte correção com relação a rugosidade de superfície:

$$\sigma_z = \sigma_{z_{PG}} \left(\frac{10 \text{ cm}}{3 \text{ cm}} \right)^{0.2} \quad (3)$$

onde $\sigma_{z_{PG}}$ é o σ_z de Pasquill-Gifford.

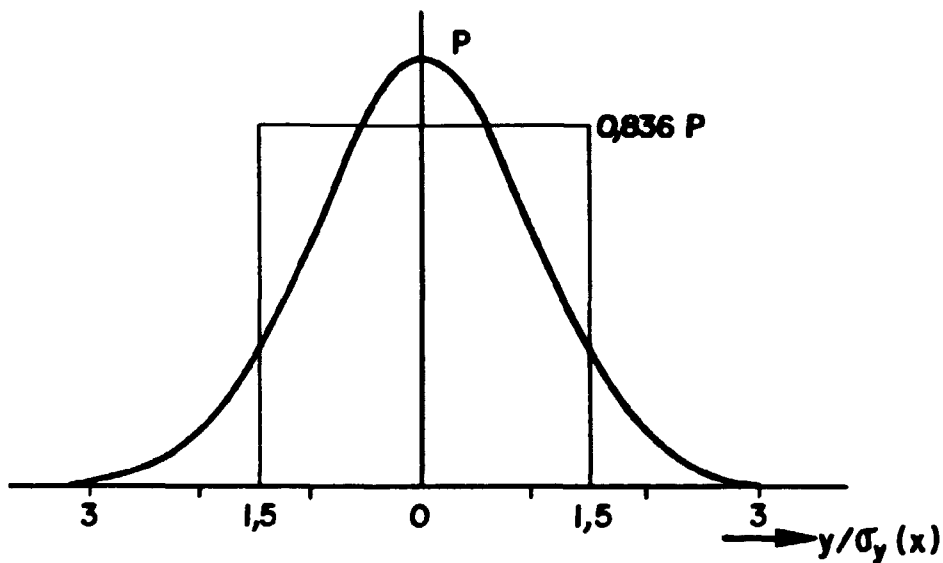


Figura 2.1 Comparação entre a distribuição Gaussiana e a distribuição *Top-Hat* utilizada no CRAC2.

Segundo Stull /36/, de maneira geral, o valor de 10 cm refere-se à rugosidade média de superfície para áreas rurais, que corresponde ao valor utilizado neste trabalho.

No presente estudo, os níveis de concentração integrada no tempo são corrigidos, de maneira a levarem em conta os seguintes fatores: decaimento radioativo, duração da liberação, altura da camada de mistura, processos de remoção seca e úmida, efeitos de *building-wake* e ascensão da pluma.

2.4.1.1 Decaimento Radioativo

Durante o transporte de radionuclídeos na atmosfera, a radioatividade dos mesmos (incluindo os produtos filhos produzidos) decairá segundo a seguinte equação:

$$Q(\text{com decaimento}) = Q \exp(-\lambda \cdot x/\bar{u}) \quad (4)$$

onde λ é a constante de decaimento radioativo, em s^{-1} .

2.4.1.2 Duração da Liberação

As curvas de Pasquill-Gifford são apropriadas para durações de liberação de até 3 minutos. Levando-se em conta as recomendações da *American Meteorological Society (AMS)* /8/, o parâmetro de dispersão horizontal (σ_y) foi corrigido de maneira a considerar o meandro da pluma, resultante de liberações de longa duração, segundo a seguinte expressão:

$$\sigma_y(T) = \sigma_y(3 \text{ minutos}) \cdot \left(\frac{T}{3 \text{ min.}} \right)^Q \quad (5)$$

onde T é a duração da liberação em minutos, e $Q = 0,2$ quando $3 < T \leq 60$ minutos e $Q = 0,25$ quando $60 < T \leq 600$ minutos. Liberações com durações maiores que 600 minutos (10 horas) são tratadas como liberações de 10 horas.

A duração da liberação é utilizada no cálculo do fator de expansão da pluma (EF), o qual, por sua vez, é utilizado no cálculo da área contaminada pela pluma (ver seção 2.7).

O fator EF é definido por:

$$EF = (T / 0,05)^Q \quad (6)$$

onde $Q = 0,2$ para $T \leq 1$ hora,

$= 0,25$ para $1 \text{ hora} < T \leq 10$ horas.

Nesta equação t é dado em horas.

2.4.1.3 Altura da Camada de Mistura

A expansão de σ_z é limitada pela existência de uma camada de mistura com altura igual a L .

A estimativa de σ_z pelo método de Pasquill-Gifford é utilizada até que o mesmo atinja o valor de $0,465 L$ (à distância de $x = x_L$). Para distâncias maiores que x_L , assume-se que σ_z varia linearmente até uma distância de $2x_L$, com $\sigma_z(2x_L) = 0,8 L$. Qualquer crescimento posterior de σ_z é limitado em $0,8 L$. Para as condições estáveis (classes de estabilidade E e F), não foi assumida a existência da camada de mistura.

2.4.1.4 Efeitos de *Building-Wake*

De modo a considerar o efeito de *building-wake* na dispersão da pluma, assumiu-se que a distribuição de concentração, tanto no plano horizontal quanto no plano vertical, é Gaussiana. Os parâmetros iniciais de dispersão da pluma são inicializados para $\sigma_y = W/3$ e $\sigma_z = A/2,15$, onde W e A são a largura e a altura do prédio, respectivamente. Observa-se que a largura da pluma ($3\sigma_y$) é igualada à largura do prédio. Assumiu-se também que se a altura da liberação (h) é menor que A , então $h = 0$.

Segundo Ritchie et alii /1/, estas aproximações não afetam as concentrações atmosféricas a longas distâncias, as quais são de interesse em estudos de conseqüências.

2.4.1.5 Ascensão da Pluma

Em acidentes onde ocorrem grandes liberações para a atmosfera, é possível que a pluma contenha uma determinada quantidade de calor sensível. O RSS, por

exemplo, considera que algumas liberações possuem taxas de liberação de energia de até centenas de milhões de BTUs por hora. Estas taxas de liberação de energia determinam a altura final da pluma e, portanto, a distância, na direção do vento, na qual a pluma toca pela primeira vez o solo (*touchdown*). Em função destas taxas, calcula-se a "ascensão" da pluma (*plume rise*).

O espectro de acidentes analisados no presente trabalho (ver seção 3.3) foi proposto por Aldrich et alii /37/, e a sua definição baseou-se nos cinco grupos de acidentes definidos na referência /17/. Dentre estes grupos, apenas o correspondente ao termo-fonte SST1, que é análogo às categorias de liberação PWR1 a PWR3 definidas no RSS, poderiam apresentar liberações com quantidades significativas de calor sensível (taxas de liberação de energia de até centenas de milhões de Btu/hora), uma vez que nestes acidentes é assumido o derretimento do núcleo do reator com falhas nos sistemas de refrigeração do núcleo e nos sistemas de remoção de calor da contenção. Para os outros grupos, as liberações de energia não seriam significantes. Contudo, todos os grupos de termos-fonte propostos por Aldrich et alii /37/ consideram que as liberações não possuem calor sensível (plumas sem flutuação), de maneira que o espectro de acidentes analisados neste trabalho considera a liberação de plumas "frias" (sem flutuação).

Aldrich et alii /37/ realizou um estudo a respeito da sensibilidade das conseqüências com relação à taxa de liberação de energia. Foi constatado que as liberações contendo calor sensível produziram um decréscimo significativo no número de mortes imediatas (as quais ocorrem em distâncias próximas ao reator) com relação às produzidas por uma liberação "fria" (sem calor sensível). Por outro lado, as mortes devidas a câncer latente (as quais podem ocorrer a grandes distâncias) praticamente não foram sensíveis à taxa de energia liberada.

Recomenda-se que para um melhor entendimento a respeito da determinação da ascensão da pluma, sejam consultados os estudos sugeridos na referência /8/, uma vez que, quando da análise de conseqüências resultantes de liberações radioativas que contenham calor sensível, o tratamento da ascensão da pluma constitui-se numa fonte adicional de incerteza. Uma discussão a respeito das incertezas no cálculo

da ascensão da pluma em análises de conseqüências é encontrada na referência /37/.

2.4.1.6 Processos de Deposição

Durante o transporte da pluma radioativa, o material radioativo pode ser removido da mesma por meio de dois processos: deposição seca e deposição úmida.

Tanto a deposição seca quanto a úmida são calculadas empregando-se o método de depleção da fonte desenvolvido por Slade /38/.

2.4.1.6.1 Deposição Seca

O processo de deposição seca pode ocorrer por vários processos, entre eles, a sedimentação (por influência da gravidade) e por impactação em obstáculos sobre ou próximos à superfície do solo.

A taxa com que o material é depositado sobre o solo é dada por:

$$\chi_D(x,y) = Vd \cdot \left(\begin{array}{l} \text{Concentração Atmosférica,} \\ \text{em Ci/m}^3 \end{array} \right) \quad (7)$$

onde:

$\chi_D(x,y)$ = concentração no solo (Ci/s.m^2);

Vd = velocidade de deposição (m/s).

A fração de cada isótopo que é removida (f_d), em um intervalo espacial, por deposição seca, é dada por:

$$f_d = \frac{Vd \cdot t_i}{h_{ef.}} \quad (8)$$

onde t_i é o tempo necessário para que a parte frontal da pluma atravesse o intervalo e $h_{ef.}$ é a altura efetiva da pluma, definida por:

$$h_{ef} = \left(\frac{\pi}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \sigma_z \cdot \exp \left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2} \right) \quad (9)$$

A escolha do valor da velocidade de deposição e do modelo de deposição podem gerar grandes incertezas. Na maioria dos estudos realizados, é comum selecionar valores de V_d entre 1,0 a 0,3 cm/s para particulados. Na análise, foi utilizada uma velocidade de deposição de 1 cm/s para todos os elementos, exceto para os gases nobres ($V_d = 0$).

Aldrich et alii /37/ efetuou um estudo da sensibilidade de conseqüências, tais como mortes e doenças devidas a exposição imediata, em função da variação de V_d , chegando à conclusão que estes tipos de conseqüências são muito sensíveis à velocidade de deposição.

2.4.1.6.2 Deposição Úmida

O processo de deposição úmida consiste em que, se houver precipitação pluviométrica quando do transporte da pluma radioativa, os aerossóis presentes na pluma serão depositados sobre o solo.

O modelo utilizado na análise considera que a deposição úmida é dependente da taxa de precipitação. A fração de cada isótopo removida da pluma (f_w) é dada

$$f_w = 1 - \exp(-\Lambda t) \quad (10)$$

onde Λ é o coeficiente de remoção úmida (*washout coefficient*), que é definido por:

$$\Lambda = CR \quad (11)$$

onde R é a taxa de precipitação observada no intervalo espacial (mm/h) e C é uma constante igual a 10^{-3} (h/mm.s) para condições instáveis e neutras e 10^{-4} (h/mm.s) para condições estáveis. Para gases nobres é assumido que $\Lambda = 0$.

2.5 Distribuição Populacional

Na avaliação das conseqüências, torna-se necessário que seja conhecida a distribuição geográfica específica da população ao redor do sítio considerado na análise. Os dados demográficos utilizados na análise consideram a população distribuída nos elementos de uma grade em coordenadas polares, que é definida por um conjunto de anéis concêntricos representando distâncias radiais ao redor do sítio, que são chamados de intervalos espaciais, e pelo conjunto de setores que representam os 16 setores de direção do vento, cada um com largura de $22,5^{\circ}$, conforme definidos na rosa-dos-ventos. Os setores são numerados em sentido horário, sendo que o setor 1 corresponde à direção norte, enquanto que os intervalos espaciais são numerados a partir do sítio do reator, sendo que o intervalo espacial 1 está centrado no sítio onde ocorre o acidente. Uma representação da grade utilizada é mostrada na Figura 2.2.

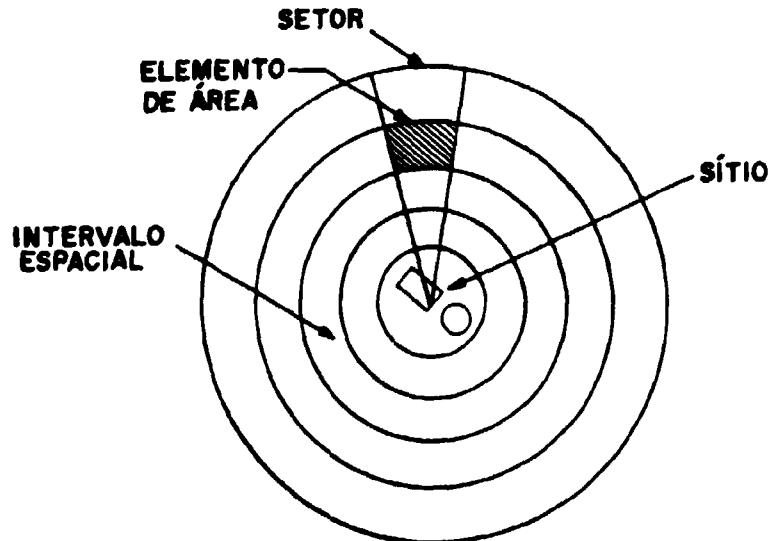


Figura 2.2 Representação da grade em coordenadas polares utilizada na distribuição populacional.

No presente trabalho, de maneira a avaliar-se a influência exercida pela

localização dos reatores, considerou-se dois tipos de distribuição populacional:

- Distribuição que considera o reator localizado próximo a um grande centro populacional, a qual caracteriza-se por apresentar áreas com grandes densidades populacionais próximas ao sítio;
- Distribuição que considera o reator localizado numa área rural, a qual caracteriza-se por apresentar centros populacionais mais distantes do reator (da ordem de dezenas de quilômetros).

Foram também postuladas distribuições populacionais que consideram áreas com densidades populacionais uniformes e não uniformes, as quais são descritas mais detalhadamente na seção 3.5.

2.6 Modelo Dosimétrico

O cálculo das doses potenciais de radiação que os indivíduos e a população podem receber, resultantes da liberação de radionuclídeos para a atmosfera, e, conseqüentemente, a avaliação dos efeitos na saúde do homem, constituem-se em fatores essenciais à análise de conseqüências. Estas doses são calculadas em função de diferentes caminhos de exposição, das concentrações de radionuclídeos na atmosfera e no solo e empregando-se fatores de conversão de dose previamente estabelecidos. Neste trabalho, foram utilizados os fatores de conversão de dose obtidos no Apêndice VI do RSS /5/.

As doses são calculadas tomando por base os intervalos espaciais. As concentrações de radionuclídeos (no ar e no solo) são consideradas uniformes para toda a área do intervalo espacial que foi contaminada pela pluma radioativa.

As exposições à radiação são divididas em duas categorias: exposição imediata, a qual ocorre durante e logo após a passagem da pluma (é da ordem de dias) e exposição crônica, a qual ocorre durante um longo período de tempo (dezenas de anos). O modelo dosimétrico utilizado neste trabalho considera os

seguintes caminhos de exposição:

- Exposição Imediata: 1) exposição externa devida a passagem da pluma (denominada *cloudshine*);
2) exposição interna devida aos radionuclídeos inalados durante a passagem da pluma;
3) exposição externa devida aos radionuclídeos depositados sobre o solo (denominada *groundshine*).
- Exposição Crônica: 1) exposição externa a longo prazo devida a contaminação do solo (denominada *long-term groundshine*);
2) exposição interna devida a inalação de radionuclídeos ressuspensos;
3) exposição interna devida a ingestão de radionuclídeos contidos em alimentos contaminados.

Antes de iniciar-se a descrição dos modelos dosimétricos, é importante observar que as várias unidades de grandeza aqui utilizadas são as mesmas que foram utilizadas no RSS, as quais pertencem ao sistema antigo de unidades, tais como o rem e o Ci. Contudo, na apresentação dos resultados da análise, as doses foram expressas em Sv.

2.6.1 Exposição Imediata

No modelo de exposição imediata, as doses são calculadas para cada órgão específico. Os órgãos considerados no cálculo são: pulmões, medula óssea, ossos (esqueleto), células ósseas de revestimento da medula óssea, parede do estômago, intestino delgado, parede do intestino grosso superior, parede do intestino grosso inferior, tireóide, outros tecidos (exceto pulmões, medula óssea, paredes do trato gastro intestinal e tireóide), corpo inteiro, testículos e ovários.

2.6.1.1 Dose Imediata Devida a Passagem da Pluma (*Cloudshine*)

O cálculo das doses imediatas resultantes da exposição externa devida a

passagem da pluma, incorpora uma aproximação de "pluma semi-infinita". A dose imediata devido ao cloudshine (E_c , em rem) é obtida da seguinte maneira:

$$E_c = A_c \cdot D_{c\infty} \cdot \left(\frac{D_c}{D_{c\infty}} \right) \quad (12)$$

onde:

A_c = concentração integrada no tempo (A_c é obtida pela multiplicação entre a concentração da pluma e a duração da exposição) ($Ci.s/m^3$);

$D_{c\infty}$ = fator de conversão de dose para pluma semi-infinita, para órgão e radionuclídeo específicos (rem/ $Ci.s/m^3$);

$(D_c/D_{c\infty})$ = fator de correção para pluma finita.

Os valores de $D_{c\infty}$ e $(D_c/D_{c\infty})$ são obtidos no Apêndice VI do RSS. A dose obtida é reduzida multiplicando-se A_c pelo fator de blindagem para exposição direta à pluma. Neste trabalho, assumiu-se que este fator é de 0,75, que corresponde ao valor utilizado quando nenhuma ação de emergência é tomada.

2.6.1.2 Dose Imediata Devida aos Radionuclídeos Depositados Sobre o Solo (Groundshine)

A dose imediata resultante da exposição externa devida aos radionuclídeos depositados sobre o solo, (E_g , em rem), considerando os processos de deposição seca e úmida, é calculada da seguinte maneira:

$$E_g = G_c \cdot D_g \cdot SF_g \quad (13)$$

onde:

G_c = concentração inicial no solo (Ci/m^2);

SF_g = fator de blindagem para exposição devida a contaminação do solo;

D_g = fator de conversão de dose (rem/ Ci/m^2).

Neste trabalho, assumiu-se que $SF_g = 0,33$, que corresponde ao valor utilizado quando nenhuma ação de emergência é tomada.

As doses devidas ao *groundshine* são calculadas para períodos de exposição de 8 horas e 7 dias.

2.6.1.3 Dose Imediata Devida a Inalação

A dose imediata resultante da exposição interna devida a inalação de radionuclídeos durante a passagem da pluma, é calculada para 11 períodos de tempo que seguem-se à exposição. Estes períodos são: o período de exposição imediata (ou aguda) (ver Tabela 2.2); 0 a 1 ano; 1 a 10 anos; 21 a 30 anos; 31 a 40 anos; 41 a 50 anos; 51 a 60 anos; 61 a 70 anos; 71 a 80 anos e períodos maiores que 80 anos. Estes períodos foram definidos de modo a considerar a dose acumulada durante a vida do indivíduo e são baseados em dados de expectativa de vida obtidos no censo de 1970 para os Estados Unidos. Para cada um destes períodos, o correspondente compromisso de dose é calculado.

Tabela 2.2 Períodos de exposição imediata utilizados na previsão das doses internas imediatas em órgãos específicos.

Órgão	Período
Pulmões	1 ano
Medula Óssea	30 dias
Células Ósseas de Revestimento da Medula Óssea, Paredes do Estômago, Intestino Delgado, Intestino Grosso Superior e Intestino Grosso Inferior	7 dias
Corpo Inteiro	2 dias

A dose imediata resultante da inalação de radionuclídeos durante a passagem da pluma (E_i , em rem), é calculada da seguinte maneira:

$$E_i = A_c \cdot BR \cdot D_{in} \quad (14)$$

onde:

A_c = concentração inicial integrada no tempo, ajustada para a duração da exposição ($C_i \cdot s/m^3$);

BR = taxa de respiração (m^3/s);

D_{in} = fator de conversão de dose para inalação, para cada órgão e período (rem/Ci).

A taxa de respiração para o Homem Referência é de $2,3 \times 10^{-4} m^3/s$, em 24 horas. Normalmente, aproximadamente metade da quantidade de ar é inalada durante um período de trabalho de 8 horas. Desde que as pessoas podem estar em atividade durante a passagem da pluma, considerou-se que a taxa de respiração é de $2,66 \times 10^{-4} m^3/s$, para os radionuclídeos inalados da pluma.

Os modelos dosimétricos utilizados na determinação dos fatores de conversão de dose para inalação levam em conta o movimento temporal do material radioativo no interior do organismo humano e consideram que as partículas possuem um diâmetro médio aerodinâmico de $1 \mu m$. De maneira a levar em conta a variação da taxa de respiração, da massa dos órgãos e do metabolismo com a idade, as doses para crianças, para determinados radionuclídeos, são corrigidas utilizando-se as razões entre as doses na criança e as doses no adulto (D_{ch}/D_{ad}), que são dadas no Apêndice VI do RSS.

2.6.2 Exposição Crônica

2.6.2.1 Dose Crônica Devida a Contaminação do Solo (*Long-Term Groundshine*)

No cálculo da dose crônica resultante da exposição externa a longo prazo devida a contaminação do solo, considera-se que a concentração inicial do solo é atenuada pelo decaimento radioativo e por processos de intemperismo do solo (considera a redução da dose proveniente da superfície do solo contaminado por vários mecanismos, tais como a remoção de material pela ação do vento, carreamento de material dissolvido na água, penetração de radionuclídeos no solo e incorporação pela vegetação).

O cálculo da taxa de dose, devida ao radionuclídeo i , é feito segundo a

seguinte equação:

$$RD^1(t) = SF_g \cdot DC^1 \cdot GC_0^1 \cdot \left[0,63 \exp(-1,13t) + 0,37 \exp(-0,0075t) \right] \cdot \exp \left(-0,693t/T_{1/2}^1 \right) \quad (15)$$

onde:

SF_g = fator de blindagem para exposição devida a contaminação do solo (= 0,33);

DC^1 = fator de conversão de dose para um órgão específico e radionuclídeo i (rem/Ci/m²/ano);

GC_0^1 = concentração inicial no solo para o radionuclídeo i (Ci/m²);

$T_{1/2}^1$ = meia-vida radioativa do radionuclídeo i (anos).

Para esta equação, t é dado em anos.

Antes, porém, que a dose individual devida ao *long-term groundshine* seja calculada, determina-se, inicialmente, se medidas de proteção, tais como a descontaminação do solo ou a interdição da área, devem ser tomadas. Para isso, a dose devida ao *long-term groundshine* (integrada no tempo do acidente) é comparada com um critério de dose, que é um nível de dose que requer a tomada das medidas de proteção citadas acima (para o CRAC2 este nível é de 25 rem em 30 anos, para o corpo inteiro). Se o critério de dose não é excedido, nenhuma ação é requerida, e as doses devidas ao *long-term groundshine* são calculadas para intervalos de tempo a partir do início do acidente.

Caso contrário, são requeridas medidas de descontaminação do solo e de interdição do local. Empregando-se os critérios definidos por Ritchie et alii /8/, que levam em conta o nível de contaminação do solo, é definido o intervalo de tempo a partir do qual as doses serão calculadas (para os casos em que a terra é interdita por tempo permanente, as doses não são calculadas). Este intervalo de tempo, denominado TIMEK, representa o tempo necessário para que fatores tais como o intemperismo do solo, o decaimento radioativo e a descontaminação do local, juntos, façam com que a contaminação do solo atinja níveis aceitáveis de maneira a

permitir o repovoamento da área.

Segundo Ritchie et alii /8/, os valores de TIMEK podem ser iguais a 0; 1 ano; 2 anos ou qualquer período entre 2 e 30 anos.

Uma vez calculado TIMEK, a dose devida o *long-term groundshine* é determinada integrando-se a equação (15) para intervalos de tempo entre TIMEK + T a TIMEK + T', onde o intervalo de T a T' corresponde ao intervalo de interesse (de 0 a 1 ano, por exemplo).

As doses individuais são calculadas para intervalos de tempo de 0 a 1 ano; 1 a 30 anos; 30 a 60 anos e para períodos maiores que 60 anos. Quando do cálculo das doses na população em um intervalo de tempo, assume-se que a população permanece constante com o tempo.

Uma descrição mais detalhada do modelo utilizado no cálculo da dose crônica devida ao *long-term groundshine* é apresentada no Apêndice VI do RSS e no estudo desenvolvido por Ritchie et alii /8/.

2.6.2.2 Dose Crônica Devida a Inalação de Radionuclídeos Ressuspensos

As doses crônicas devidas a inalação de radionuclídeos ressuspensos são calculadas para intervalos de tempo após TIMEK, o qual foi determinado no cálculo das doses crônicas devidas ao *long-term groundshine*.

As doses são calculadas em função de dois parâmetros: fator de ressuspensão de radionuclídeos $K(t)$ e da taxa de inalação de radionuclídeos ressuspensos $I^1(t)$.

O fator $K(t)$ é definido pela seguinte expressão:

$$K(t) = K_0 \cdot \exp(-\lambda t) + K_e \quad (16)$$

onde:

$$K_0 = 10^{-5} \text{ m}^{-1};$$

$$K_e = 10^{-9} \text{ m}^{-1};$$

$$\lambda = \ln 2/0,977 = 0,677 \text{ ano}^{-1}.$$

Nesta equação, o tempo t é dado em anos.

A taxa de inalação de radionuclídeos ressuspensos é dada pela seguinte equação:

$$I^i(t) = BR \cdot (GC_0^i) \cdot \exp(-0,693t/T_{1/2}^i) \cdot K(t) \quad (17)$$

onde:

$I^i(t)$ = taxa de inalação do radionuclídeo i (Ci/ano);

BR = taxa de respiração (igual à taxa de respiração do Homem Referência, que é de $7.300 \text{ m}^3/\text{ano}$);

$K(t)$ = fator de ressuspensão dependente do tempo (m^{-1});

$\exp(-0,693t/T_{1/2}^i)$ = fator que representa o decaimento radioativo do radionuclídeo i .

A quantidade total do radionuclídeo i que é inalada (em Ci) é calculada integrando-se a equação (17) para o intervalo de tempo entre $\text{TIMEK} + T$ a $\text{TIMEK} + T'$, onde o intervalo de T a T' corresponde ao intervalo de interesse (de 0 a 10 anos, por exemplo), conforme mostra a seguinte expressão:

$$I^i(T - T' \text{ anos}) = \int_{\text{TIMEK}+T}^{\text{TIMEK}+T'} I^i(t) dt \quad (18)$$

Este cálculo é feito para os seguintes intervalos: 0 a 10 anos, 10 a 20 anos; 20 a 30 anos, 30 a 40 anos; 40 a 50 anos e períodos maiores que 50 anos.

A dose de radiação (em rem) para um órgão o , em j intervalos de tempo após TIMEK , é dada pela seguinte equação:

$$DI_{j,o} = \sum_{k=1}^j \sum_{l=1}^9 DC(i,o,j+1-k) \cdot I_k^i \quad (19)$$

onde:

$DC(i,o,j+1-k)$ = fator de conversão de dose para o órgão o e o radionuclídeo i (rem/Ci);

I_k^i = quantidade de radionuclídeo i inalada durante o intervalo k (Ci);

$k = 1$, para intervalos de 0 a 10 anos após TIMEK,

2, para intervalos de 10 a 20 anos após TIMEK, e assim por diante.

O fator DC foi calculado para os intervalos de 0 a 10 anos; 10 a 20 anos; 20 a 30 anos; 30 a 40 anos; 40 a 50 anos e períodos maiores que 50 anos, após a exposição.

Uma descrição mais detalhada do modelo utilizado no cálculo da dose crônica resultante da inalação de radionuclídeos ressuspensos é apresentada no Apêndice VI do RSS e no estudo desenvolvido por Ritchie et alii /8/.

2.6.2.3 Doses Crônicas Devidas a Ingestão

O cálculo das doses crônicas resultantes da exposição interna devida a ingestão de radionuclídeos contidos em alimentos contaminados, depende diretamente dos dados de agricultura e dos padrões de consumo de alimentos para a região de interesse.

Um estudo realizado no RSS, à respeito da contribuição dos diferentes modos de exposição para a ocorrência de mortes devidas a câncer latente, constatou que a ingestão de alimentos contaminados contribui de maneira pouco significativa no número total deste tipo de efeito (segundo a Tabela VI 13-3 do RSS, esta contribuição foi de apenas 1%). Em vista disso, no presente trabalho optou-se pela não consideração da exposição resultante da ingestão no cálculo das doses crônicas.

Acrescente-se a isso que, no presente trabalho, realizou-se uma comparação entre as conseqüências resultantes, considerando-se a ingestão e a não ingestão de alimentos contaminados. Os resultados são apresentados no item 4.6.5.

2.7 Efeitos na Saúde do Homem

Os efeitos na saúde do homem são agrupados em duas classes principais:

- **Efeitos Imediatos:** incluem mortes imediatas e doenças que se manifestam a curto prazo, as quais requerem atenção médica e hospitalização. Estes efeitos ocorrem em períodos de dias a um ano após a exposição.
- **Efeitos Latentes:** incluem mortes devidas a câncer, efeitos na tireóide e alterações genéticas. Estes efeitos ocorrem muitos anos após o período inicial de exposição, sendo resultantes de exposição imediata e de exposição crônica.

A avaliação destes efeitos é realizada por meio do acoplamento entre os modelos que representam os modos de exposição, os modelos dosimétricos e os modelos de dose-resposta. A Figura 2.3 ilustra um esquema simplificado da integração entre os vários modelos.

A magnitude dos efeitos na saúde está associada a dois parâmetros que são característicos do sítio: a distribuição populacional e a rosa-dos-ventos.

A previsão destes efeitos é feita tomando por base os intervalos espaciais. Para um determinado intervalo espacial, o modelo define a área deste intervalo que estará contaminada. Esta área é determinada em função do "raio" do intervalo (diferença entre o raio externo e interno do intervalo), do espalhamento lateral da pluma e do fator de expansão da pluma (ver item 2.4.1.2). O modelo assume que as doses e os efeitos na saúde são uniformes para toda a área contaminada do intervalo espacial.

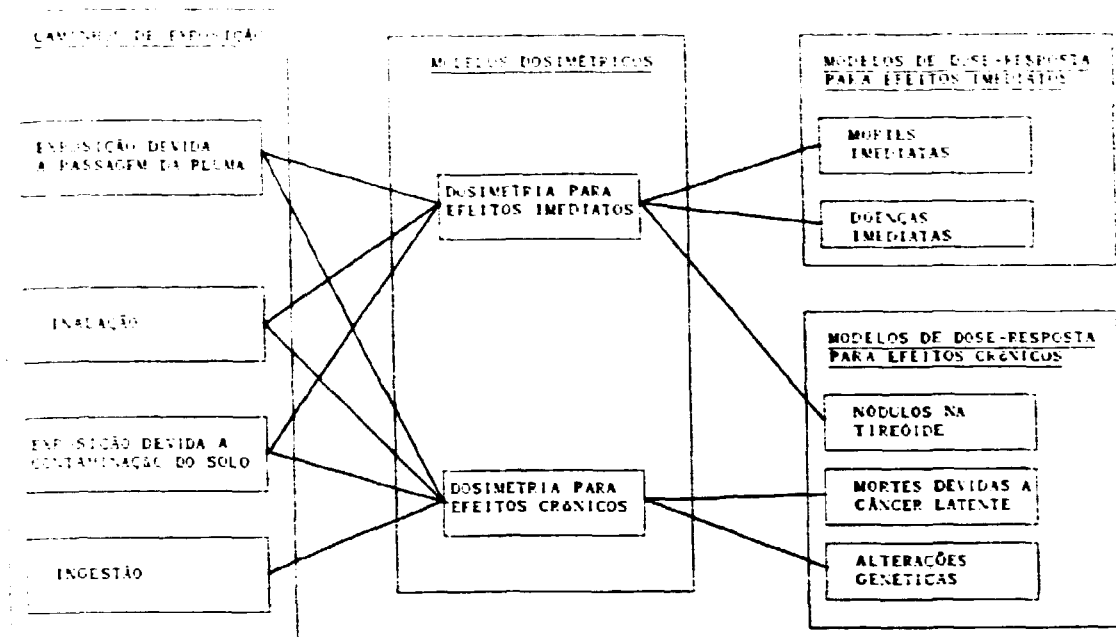


Figura 2.3 Esquema simplificado dos modelos que representam os caminhos (modos) de exposição, dos modelos dosimétricos e dos modelos de dose-resposta utilizados na previsão dos efeitos na saúde do homem.

A população do intervalo espacial encontra-se dividida em setores de $22,5^\circ$. A razão entre a área do intervalo coberta pela pluma e a área de um setor do intervalo determina o número e a fração de setores envolvidos. Este tipo de procedimento é feito para todos os 16 setores do intervalo espacial. Desse modo, tem-se que o cálculo dos efeitos na saúde considera a distribuição da população para todas as direções do vento. Nos resultados finais, são consideradas as freqüências de direção do vento, conforme definidas na rosa-dos-ventos.

No presente trabalho foram calculadas as mortes imediatas, as mortes devidas a câncer latente (calculadas para órgãos individuais) e os efeitos na tireóide, que serão sucintamente descritos a seguir.

2.7.1 Mortes Imediatas

Os principais contribuintes para o risco de morte devido a exposição

imediatas são as doses na medula óssea, nos pulmões e no trato gastrointestinal. A probabilidade de morte resultante da irradiação da medula óssea normalmente é predominante com relação às probabilidades relacionadas com a irradiação dos pulmões e do trato gastrointestinal.

O número de mortes imediatas para os três órgãos é previsto com base em curvas de dose-mortalidade estabelecidas no RSS. A Figura 2.4 reproduz as curvas de dose-mortalidade para a medula óssea, em função do tipo de tratamento médico. Neste trabalho, adotou-se a curva B, que considera que para as pessoas afetadas foi oferecido um tratamento médico suporte, que consiste de hospitalização, uso de antibióticos e transfusão de sangue. A curva B considera que uma dose imediata de 5,1 Sv (510 rem), na medula óssea, seria letal para 50% da população afetada dentro de 60 dias (LD_{50/60}).

Na previsão do número de mortes imediatas são utilizadas aproximações para as curvas de dose-mortalidade dos três órgãos, que são construídas, dentro do código, por meio de interpolação linear, a partir de pontos da curva calculados a priori.

A probabilidade total (P) de mortes imediatas é calculada em função das probabilidades de mortes imediatas resultantes da irradiação da medula óssea (P₁), pulmões (P₂) e trato gastro-intestinal (P₃), ou seja:

$$P = P_1 + (1-P_1)P_2 + (1-P_1)(1-P_2)P_3 \quad (20)$$

As mortes imediatas (n_e) são obtidas em função das doses imediatas individuais, da distribuição populacional em cada elemento de área exposto à pluma e das probabilidades associadas, ou seja:

$$n_e = \sum_{s=1}^{16} \sum_{r=1}^{10} POP_{sr} \left[1 - \prod_i^3 \left(1 - P_i \left(\sum_{k=1}^{54} \sum_{j=1}^3 DE_{ikrs} \right) \right) \right] \quad (20a)$$

onde:

r = número de intervalos espaciais expostos à pluma;

s = número de setores expostos à pluma;

POP_{sr} = população no setor s do intervalo r ;

P_i = probabilidade de morte imediata para o órgão i (mortes/ pessoa);

$DE_{i,kr,s}$ = dose imediata individual para o órgão i , radionuclídeo k , no setor s do intervalo espacial r (rem);

$j = 1$, para doses imediatas devidas ao *groundshine*;

2, para doses imediatas devidas ao *cloudshine*;

3, para doses imediatas devidas a inalação.

2.7.2 Mortes Devidas a Câncer Latente

A mortalidade devida a câncer latente é calculada em função das exposições imediatas e crônicas. Este tipo de efeito caracteriza-se por um período de latência, durante o qual não há acréscimo no número de cânceres, e por um período de *plateau*, em que ocorrem cânceres a uma taxa uniforme, por um período de anos, conforme é ilustrado na Figura 2.5.

Para a previsão do número de mortes devidas a câncer latente podem ser utilizados dois modelos: o método linear e o método denominado *Central Estimate*. O modelo linear assume uma relação linear entre as doses e as mortes devidas a câncer latente (não existe limiar de dose). Esta hipótese implica em que o número de mortes devidas a câncer é proporcional à dose na população (homem.rem). No presente trabalho, foi utilizado o modelo *Central Estimate*, que faz uma aproximação linear por intervalos (*piece-wise linear*) entre as doses e as mortes devidas a câncer. Esta aproximação está baseada na hipótese que baixas doses e taxas de dose resultam num reduzido risco de câncer por unidade de dose. Neste modelo, os fatores de risco (mortes esperadas devidas a câncer por 10^6 homem.rem; ver item 2.7.2.3) são reduzidos por um fator de 5 para doses menores que 0,3 Sv e por um fator de 2,5 para doses entre 0,3 e 3 Sv.

O número total previsto de mortes devidas a câncer latente pode ser expresso por:

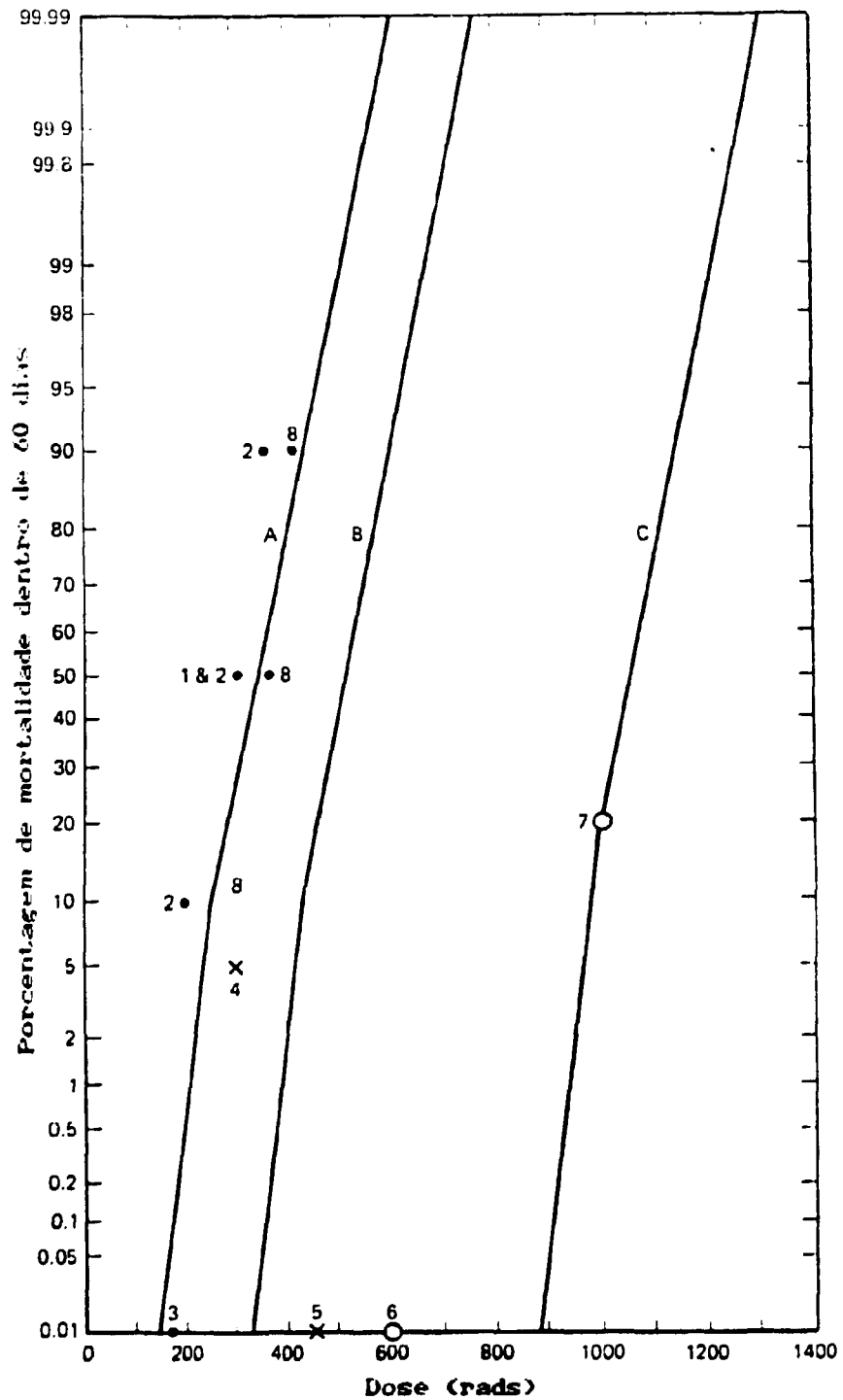


Figura 2.4 Curvas do critério de dose-mortalidade, para a medula óssea, em função do grau de tratamento médico. Tratamento médico mínimo (curva A); tratamento suporte, que inclui hospitalização, antibióticos e transfusão de sangue (curva B); tratamento heróico, que inclui todas as etapas do tratamento acima adicionado ao transplante de medula (curva C). (Fonte: RSS /5/)

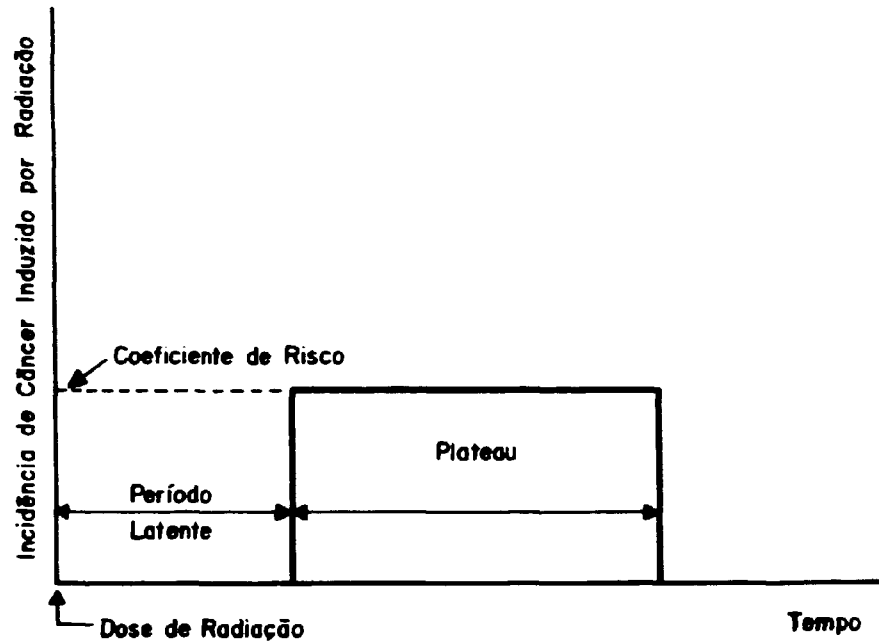


Figura 2.5 Modelo básico utilizado para câncer latente.

$$NI = NI_{e,ext} + NI_{e,int} + NI_{c,ext} + NI_{c,int} \quad (21)$$

onde:

$NI_{e,ext}$ = número de mortes devidas a câncer resultantes de exposição externa imediata;

$NI_{e,int}$ = número de mortes devidas a câncer resultantes de exposição interna imediata;

$NI_{c,ext}$ = número de mortes devidas a câncer resultantes de exposição externa crônica;

$NI_{c,int}$ = número de mortes devidas a câncer resultantes de exposição interna crônica.

Na Figura 2.6 são mostrados os diversos modos de exposição que contribuem para a previsão do número de mortes devidas a câncer latente.

2.7.2.1 Mortalidade Devida à Exposição Imediata

O número total previsto de mortes devidas a câncer latente resultantes de

exposição imediata é dado pela soma das componentes ($n_{ie,ext}$) e ($n_{ie,int}$).

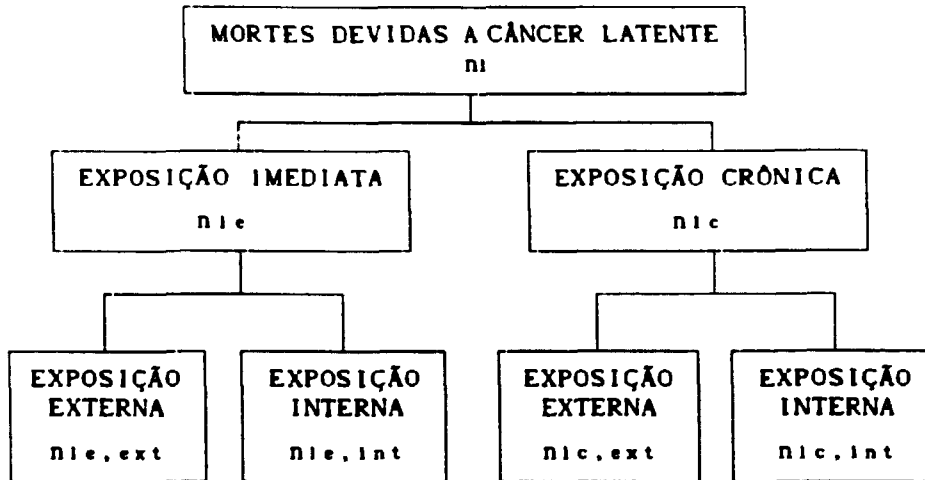


Figura 2.6 Modos de exposição considerados na previsão do número de mortes devidas a câncer latente.

O valor de $n_{ie,ext}$ é calculado pela seguinte expressão:

$$n_{ie,ext} = \sum_i \left[MRCON_{i1} \sum_{s=1}^{16} \sum_{r=1}^{10} POP_{sr} \left(\sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^{54} DE_{,ext}_{ijkrs} \right) \right] \quad (22)$$

onde:

$DE_{,ext}_{ijkrs}$ = dose devida ao *groundshine* ($j=1$) e ao *cloudshine* ($j=2$), para o radionuclídeo k , órgão i , no setor s do intervalo espacial r (rem), recebida no primeiro ano após o acidente;

$MRCON_{i1}$ = fator de risco para o órgão i (mortes esperadas por 10^6 homem.rem), para o intervalo de 0 a 1 ano.

O valor de $n_{ie,int}$ é calculado pela expressão:

$$n_{ie,int} = \sum_{t=1}^{10} \sum_i \left[MRCON_{it} \sum_{s=1}^{16} \sum_{r=1}^{10} POP_{sr} \left(\sum_{k=1}^{54} DE_{,int}_{ikrst} \right) \right] \quad (23)$$

onde:

$DE_{,int}_{ikrst}$ = dose devida a inalação de radionuclídeos durante a passagem da pluma, para o radionuclídeo k , órgão i , intervalo de tempo t , no

setor s do intervalo espacial r (rem).

2.7.2.2 Mortalidade Devida à Exposição Crônica

O número previsto de mortes devidas a câncer latente resultantes de exposição crônica é dado também pela soma de duas componentes: $(n_{lc,ext})$ e $(n_{lc,int})$.

O valor de $n_{lc,ext}$ é calculado pela expressão:

$$n_{lc,ext} = \sum_i \left[MRCON_{ii} \sum_{s=1}^{16} \sum_{r=1}^{10} \left(\sum_t POP_{prt} \left(\sum_{m=1}^{10} DC_{,ext}_{imrst} \right) \right) \right] \quad (24)$$

onde $DC_{,ext}_{imrst}$ é a dose devida ao *groundshine*, para o radionuclídeo m, órgão i, intervalo de tempo t, no setor s do intervalo espacial r (rem). Os radionuclídeos considerados nos cálculos encontram-se listados na Tabela 2.3.

Como na análise não foi considerada a ingestão de radionuclídeos, as mortes devidas a câncer resultantes de exposição interna crônica $(n_{lc,int})$ levaram em conta apenas a inalação de radionuclídeos ressuspensos, sendo que as mesmas podem ser previstas da seguinte maneira:

$$n_{lc,int} = \sum_i MRCON_{ii} \sum_{s=1}^{16} \sum_{r=1}^{10} \sum_t POP_{prt} \sum_{n=1}^{10} DC_{,int}_{inrst} \quad (25)$$

onde:

$DC_{,int}_{inrst}$ = dose devida a inalação de radionuclídeos ressuspensos, para o radionuclídeo n, órgão i, intervalo de tempo t, no setor s do intervalo espacial r (rem).

2.7.2.3 Órgãos e Fatores de Risco Considerados na Análise

No cálculo do número de mortes devidas a câncer latente, são considerados os seguintes órgãos: medula óssea, pulmões, mamas, ossos, trato gastrointestinal

(incluindo o estômago) e outros (incluindo o pâncreas e excluindo a tireóide).

Tabela 2.3 Radionuclídeos considerados na previsão dos efeitos na saúde resultantes de exposição crônica.

Caminho de Exposição Crônica	
<i>Groundshine</i>	Inalação
Co-58	Sr-90
Co-60	Ru-106
Zr-95	Cs-137
Nb-95	Pu-238
Ru-103	Pu-239
Ru-106	Pu-240
I-131	Pu-241
Cs-134	Am-241
Cs-136	Cm-242
Cs-137	Cm-244

Os valores dos fatores de risco para cada órgão (número de mortes esperadas por 10^6 homem.rem) considerando os intervalos de tempo após o acidente, para exposições externa e interna, são os publicados nas referências /1/ e /8/. Estes fatores de risco são versões atualizadas daqueles descritos no Apêndice VI do RSS e são mostrados nas Tabelas 2.4 e 2.5. Os fatores de risco do RSS consideram um período de latência de 0 a 15 anos e períodos de *plateau* de 10 a 30 anos. Os fatores utilizados no CRAC2 consideram períodos de *plateau* que estendem-se até o fim da vida do indivíduo, para todos os tipos de câncer (exceto leucemia) e para todas as faixas de idade (dos indivíduos expostos). No cálculo destes fatores de risco foi considerada a população dos Estados Unidos (censo de 1970).

Para exposição externa imediata e crônica e para exposição interna crônica, são utilizados fatores de risco correspondentes ao intervalo de 0 a 1 ano (MRCONii).

Tabela 2.4 Mortes esperadas devidas a câncer por 10^6 homem.rem, para exposição externa.

Tipo de Câncer	Mortes Esperadas Devidas a Câncer por 10^6 homem.rem (exp. externa)	
	CRAC	CRAC2
Leucemia	28,4	28,4
Pulmão	22,2	27,5
Seio	25,6	31,7
Osso	6,9	10,1
Trato Gastroint.	13,6	16,9
"Outros"	25,0	42,4

Tabela 2.5 Mortes esperadas devidas a câncer por 10^6 homem.rem, para exposição interna.

Tipo de Câncer	Mortes Esperadas Devidas a Câncer por 10^6 homem.rem (exposição interna)								
	Período de Tempo Após o Acidente (anos)								
	0-1	1-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80
Leucemia	28,4	27,2	18,7	13,8	9,7	6,8	4,0	1,7	0,5
Pulmão	27,5	27,5	27,5	15,	8,1	4,0	1,5	0,2	0,0
Seio	31,7	31,7	31,7	10,	9,4	4,6	1,7	0,3	0,0
Osso	11,1	10,6	7,0	3,	1,7	0,9	0,4	0,1	0,0
Trato Gastroint.	16,9	16,9	16,9	9,	5,0	2,5	0,9	0,1	0,0
"Outros"	32,2	30,5	25,4	14,	7,5	3,7	1,4	0,2	0,0

2.7.3 Efeitos na Tireóide

A avaliação dos efeitos na tireóide consiste do cálculo do número total previsto de nódulos na tireóide (benignos e malignos), que podem resultar de doses imediatas e de doses crônicas recebidas no intervalo de 0 a 1 ano.

As doses imediatas para a tireóide são calculadas de acordo com as seguintes considerações:

- dose externa devida ao *cloudshine*;
- + dose externa devida ao *groundshine*;
- + dose interna recebida durante os primeiros 30 dias, resultante de todos os radionuclídeos inalados, exceto o ^{131}I ;
- + 1/10 da dose interna durante os primeiros 30 dias, resultante da inalação do ^{131}I .

Para o cálculo das doses crônicas recebidas no intervalo de 0 a 1 ano, as doses devidas ao ^{131}I são tratadas sem diferença com relação aos demais radionuclídeos, sendo que o cálculo é feito da mesma maneira que para as mortes devidas a câncer latente.

Os fatores de risco utilizados na previsão do número de nódulos na tireóide são mostrados na Tabela 2.6. Desta tabela, pode-se observar que o modelo utilizado considera que dos casos com nódulos cancerígenos, a taxa de mortalidade é de apenas 10%, e que para as doses acima de 5.000 rem, não é contado o número de nódulos, sejam eles benignos ou malignos, uma vez que, conforme é observado por Maletskos et alii /39/, para doses acima de 5.000 rem considerou-se que ocorre a ablação da tireóide.

2.7.4 Observações a Respeito das Incertezas Relacionadas aos Modelos Dosimétrico e de Efeitos na Saúde do Homem

No modelo dosimétrico utilizado, podem ser identificadas várias áreas de incertezas que influenciam a previsão de doses de radiação, a saber: taxa de respiração, tamanho das partículas, tempo no qual as pessoas são expostas, incorporação e retenção de radionuclídeos, fatores de blindagem, ressuspensão de radionuclídeos e taxas de deposição (incluindo a influência de precipitação). Uma discussão à respeito das incertezas relacionadas a estes fatores é encontrada nas

referências /39/ e /40/.

Tabela 2.6 Fatores de risco utilizados na previsão do número de nódulos na tireóide.

Dose (rem)	Número Esperado de Nódulos /10 ⁵ homem.rem		
	Benigno	Malígnio	Mortes
<1500	200	134	13,4
1500-5000	100	67	6,7
>5000	0	0	0

Com relação às incertezas na previsão dos efeitos na saúde do homem, existem poucos estudos a este respeito. Em vista disso, são citadas apenas algumas áreas de incerteza, tais como: a definição dos limiares de dose para as relações de dose-efeito; a escolha das curvas de resposta de dose para mortes imediatas, uma vez que no RSS, com relação à medula óssea, por exemplo, são apresentadas três curvas, de acordo com o tratamento médico assumido (cada curva apresenta diferentes valores de LD50/60) e, finalmente, a escolha do modelo linear ou de outras hipóteses para a previsão das mortes devidas a câncer latente. Maletskos et alii /39/ apresenta uma discussão à respeito das incertezas associadas à previsão dos efeitos na saúde do homem.

Em 1985, foi publicado o estudo de Evans /41/, onde foram desenvolvidos novos modelos para o cálculo dos efeitos na saúde, baseados em novos dados e em técnicas revisadas com relação aos modelos do RSS. Estes modelos foram incorporados ao código MACCS /9/, que foi lançado recentemente. Neste código, a previsão dos efeitos imediatos na saúde do homem é feita empregando-se as denominadas funções de "risco" (*hazard functions*) recomendadas por Evans /41/. A previsão dos efeitos latentes na saúde é feita utilizando-se basicamente os mesmos modelos empregados no RSS, com a diferença que no MACCS é utilizado um modelo de regressão polinomial de segundo grau, com componentes linear e quadrática (*linear-quadratic model*), sem limiar (*zero-threshold*), para dose-resposta. Este

modelo, segundo Ritchie et alii /1/, tende a reduzir a incidência de câncer com relação ao modelo linear utilizado no RSS.

Capítulo 3

Aplicação ao Reator BR3

Neste capítulo, é feita a análise das conseqüências dos acidentes postulados para o reator de referência BR3.

Na análise, considerou-se que um reator com características idênticas ao BR3 encontra-se localizado num sítio próximo a um grande centro populacional e num sítio localizado em uma área com características demográficas típicas de uma região rural.

3.1 Descrição do Reator

O BR3 é um reator de pesquisa, do tipo PWR, de 49,2 MW de potência térmica /42/, /43/ localizado no sítio do *Belgian Nuclear Research Centre*, na cidade de Mol, na Bélgica.

O BR3 foi o primeiro reator europeu do tipo PWR, e teve sua primeira criticalidade em 1962, sendo utilizado para estudar o comportamento de combustíveis submetidos a irradiação elevada, em um amplo espectro de condições de irradiação, ou seja, trata-se de um PWR em que as varetas de combustível são submetidas a condições de irradiação muito próximas àquelas encontradas em grandes instalações comerciais de potência /44/.

3.2 Inventário Radioativo

O inventário dos radionuclídeos foi calculado com o programa ORIGEN2 /22/, que é uma versão revisada do código ORIGEN /45/.

No cálculo foram adotadas as seguintes hipóteses:

- O combustível consiste apenas de UO₂;
 - O reator encontra-se em ciclo de equilíbrio, inicialmente carregado com
-

urânio enriquecido a 3% em ^{235}U ;

- O inventário foi calculado para o instante correspondente ao início do acidente, após um tempo de irradiação de 333 dias;
- Este tempo de irradiação foi considerado com base nos dados referentes às últimas campanhas de irradiação do BR3 /44/, /46/;
- O reator opera com uma potência específica constante igual à 52,9 kW/kg de urânio;
- No cálculo dos produtos de ativação, o único material estrutural considerado foi o Zircaloy-4, que constitui o encamisamento do combustível.

Os radionuclídeos considerados são aqueles listados na Tabela 2.1. O inventário calculado para o reator BR3, conforme as condições descritas acima, é apresentado na Tabela 3.1.

3.3 Definição das Categorias de Acidentes

Conforme visto anteriormente no item 2.2.1, a USNRC /17/ definiu cinco grupos de acidentes, os quais são representativos do espectro das condições de acidentes potenciais. Estes grupos foram definidos em função do nível de degradação do núcleo, da integridade da contenção e de falhas dos dispositivos técnicos de segurança do núcleo e da contenção. Com base nesses acidentes, a USNRC definiu um conjunto de cinco grupos de termos-fonte, denominado *Siting Source Terms* (SST1-5), que foram desenvolvidos para auxiliar na tomada de decisões em processos de escolha de sítio, planejamento de emergência e para dar subsídios para uma possível modificação do critério de escolha de sítio para reatores nucleares, conforme proposto por Aldrich et alii /37/.

A descrição de cada um dos cinco grupos de termos-fonte, conforme definido em estudo de Blond & Taylor /18/, é apresentada a seguir :

SST1-Este termo-fonte tende a ser representativo das liberações mais severas de produtos de fissão. O SST1 envolve a falha ou perda de vários dispositivos técnicos de segurança, incluindo a refrigeração de emergência do núcleo e a

Tabela 3.1 Inventário radioativo do reator BR3.

Número	Nome	Atividade (Ci)
1	Co-58	6,490E+00
2	Co-60	7,240E-02
3	Kr-85	5,350E+03
4	Kr-85m	3,750E+05
5	Kr-87	7,260E+05
6	Kr-88	1,020E+06
7	Rb-86	1,310E+03
8	Sr-89	1,430E+06
9	Sr-90	4,080E+04
10	Sr-91	1,710E+06
11	Y-90	4,330E+04
12	Y-91	1,800E+06
13	Zr-95	2,290E+06
14	Zr-97	2,250E+06
15	Nb-95	2,250E+06
16	Mo-99	2,410E+06
17	Tc-99m	2,110E+06
18	Ru-103	1,890E+06
19	Ru-105	1,230E+06
20	Ru-106	3,120E+05
21	Rh-105	1,090E+06
22	Sb-127	1,340E+05
23	Sb-129	4,110E+05
24	Te-127	1,300E+05
25	Te-127m	1,490E+04
26	Te-129	4,040E+05
27	Te-129m	5,990E+04
28	Te-131m	1,890E+05
29	Te-132	1,880E+06
30	I-131	1,310E+06
31	I-132	1,900E+06
32	I-133	2,710E+06
33	I-134	2,970E+06
34	I-135	2,520E+06
35	Xe-133	2,620E+06
36	Xe-135	4,230E+05
37	Cs-134	4,960E+04
38	Cs-136	3,220E+04
39	Cs-137	5,270E+04
40	Ba-140	2,370E+06
41	La-140	2,470E+06
42	Ce-141	2,260E+06
43	Ce-143	2,090E+06
44	Ce-144	1,110E+06
45	Pr-143	2,040E+06
46	Nd-147	8,850E+05
47	Np-239	2,600E+07
48	Pu-238	4,200E+02
49	Pu-239	2,520E+02
50	Pu-240	2,770E+02
51	Pu-241	5,990E+04
52	Am-241	2,230E+01
53	Cm-242	5,580E+03
54	Cm-244	1,060E+02

contenção, ocorrendo o decaimento do núcleo. Neste grupo inclui-se o

rompimento da contenção devido à explosão de vapor (provocada pelo combustível fundido em contato com a água residual no vaso do reator), sobrepressão incluindo efeitos de queima de hidrogênio e bypass da contenção através de sistemas;

SST2-Esta categoria abrange as seqüências de acidentes que envolvem a perda de refrigeração do núcleo, mas com os dispositivos técnicos de segurança operando. O núcleo é severamente danificado ou derrete. A liberação de produtos de fissão é devida às falhas de isolamento da contenção ou por queima de hidrogênio e sobrepressurização. É relativamente similar à categoria PWR-5 do RSS, em termos de conseqüências potenciais;

SST3-Nesta categoria ocorre a perda de refrigeração do núcleo, com danos severos ou derretimento do mesmo. Essencialmente, todos os sistemas de mitigação da liberação de produtos de fissão funcionam como previsto em projeto. Neste caso, a liberação de produtos de fissão ocorre devida às pequenas falhas na contenção, com uma taxa de escape prevista de 1% por dia, ou através do solo, uma vez que o núcleo fundido atravessa a base de concreto da contenção. Esta liberação é análoga à categoria PWR-7 do RSS;

SST4-Este termo-fonte envolve os acidentes em que o núcleo apresenta um derretimento parcial, envolvendo a degradação dos sistemas de refrigeração do núcleo, com os sistemas da contenção operando conforme previsto em projeto. A liberação dos produtos de fissão da contenção ocorre a uma taxa prevista de 1% por dia. Esta liberação equivale à categoria PWR-9 do RSS;

SST5-Esta categoria abrange seqüências de acidentes com danos modestos ou limitados do núcleo, nos quais os sistemas da contenção operam conforme previsto em projeto. O escape dos produtos de fissão da contenção ocorre a uma taxa prevista de 0,1% por dia. As liberações deste grupo equivalem a um décimo das liberações da categoria PWR-9 do RSS.

Baseado nas avaliações probabilísticas disponíveis, a USNRC /37/ sugeriu

que as frequências de ocorrência anuais, representativas para as categorias acima são:

$$SST1 = 1 \times 10^{-5}; SST2 = 2 \times 10^{-5}; SST3, SST4 e SST5, combinadas = 1 \times 10^{-4}.$$

Segundo Aldrich et alii /37/, o conjunto de termos-fonte descrito acima, com suas frequências anuais de ocorrência associadas, representa, de maneira aproximada, qualquer projeto de reator do tipo LWR, ou seja, a aplicação destes termos-fonte é genérica.

Um resumo dos termos-fonte propostos por Aldrich et alii /37/, envolvendo as características das liberações e frações de liberação, é apresentado na Tabela 3.2.

Considerou-se que os acidentes postulados para o reator BR3 geram termos-fonte que estão incluídos nos cinco grupos de termos-fonte descritos acima.

Na Tabela 3.3 são apresentadas as atividades de cada radionuclídeo, no momento da liberação, para todos os termos-fonte (SST1 a SST5).

3.4 Meteorologia

No presente trabalho, empregou-se os dados meteorológicos relativos ao sítio do IPEN. Considerou-se que o cenário de condições meteorológicas abrangeu toda a região considerada na análise de conseqüências, mantendo-se constante durante o período correspondente à duração da liberação. A definição da região considerada encontra-se no ítem 3.5.

Com o objetivo de que os resultados de uma análise de conseqüências representem condições próximas à realidade, normalmente são utilizadas observações horárias de direção e velocidade do vento, categoria de estabilidade atmosférica e precipitação pluviométrica total, válidas para o período de um ano, coletadas no próprio sítio ou em estações meteorológicas próximas ao mesmo. Como para o sítio

Tabela 3.2 Resumo das liberações e parâmetros associados, para os termos-fonte SST1 a SST5.

Características da Liberação ^a	Termo-Fonte				
	SST1	SST2	SST3	SST4	SST5
Tempo de Liberação (h)	1,5	3,0	1,0	0,5	0,5
Duração da Liberação (h)	2,0	2,0	4,0	1,0	1,0
Altura da Liberação (m)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Energia Associada à Lib.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<u>Frações de Liberação</u>					
Xe-Kr	1,0	0,9	6×10^{-3}	3×10^{-6}	3×10^{-7}
I	0,45	3×10^{-3}	2×10^{-4}	1×10^{-7}	1×10^{-8}
Cs-Rb	0,67	9×10^{-3}	1×10^{-5}	6×10^{-7}	6×10^{-8}
Te-Sb	0,64	3×10^{-2}	2×10^{-5}	1×10^{-9}	1×10^{-10}
Ba-Sr	0,07	1×10^{-3}	1×10^{-6}	1×10^{-11}	1×10^{-12}
Ru	0,05	2×10^{-3}	2×10^{-6}	0,0	0,0
La	9×10^{-3}	3×10^{-4}	1×10^{-6}	0,0	0,0

(a) Conforme definido no RSS /5/.

do IPEN não existem dados dessa natureza, procurou-se utilizar dados que pudessem representar, da maneira mais realística possível, as condições climáticas para o sítio e vizinhanças.

O cenário das condições meteorológicas empregado na análise foi definido a partir de dados fornecidos pelo Relatório de Análise de Segurança (RAS) do Reator IPEN-MB-01 /47/, o qual localiza-se no sítio do IPEN. Estes dados foram coletados na Estação Hidrometeorológica da Cidade Universitária, pertencente ao Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE), e compreendem o período de janeiro de 1974 a dezembro de 1985.

Tabela 3.3 Atividade, em Ci, de cada radionuclídeo, no momento da liberação, para os termos-fonte SST1 a SST5.

Número	Radionuc.	ATIVIDADE (Ci)				
		SST1	SST2	SST3	SST4	SST5
1	Co-58	3,240E-01	1,300E-02	1,300E-05	0	0
2	Co-60	3,620E-03	1,450E-04	1,450E-07	0	0
3	Kr-85	5,350E+03	4,810E+03	3,210E+01	1,600E-02	1,600E-03
4	Kr-85m	2,970E+05	2,120E+05	1,930E+03	1,040E+00	1,040E-01
5	Kr-87	3,200E+05	1,270E+05	2,520E+03	1,660E+00	1,660E-01
6	Kr-88	7,040E+05	4,370E+05	4,780E+03	2,700E+00	2,700E-01
7	Rb-86	8,760E+02	1,170E+01	1,310E-02	7,850E-04	7,850E-05
8	Sr-89	1,000E+05	1,430E+03	1,430E+00	1,430E-05	1,430E-06
9	Sr-90	2,860E+03	4,080E+01	4,080E-02	4,080E-07	4,080E-08
10	Sr-91	1,070E+05	1,370E+03	1,590E+00	1,650E-05	1,650E-06
11	Y-90	3,890E+02	1,300E+01	4,330E-02	0	0
12	Y-91	1,620E+04	5,400E+02	1,800E+00	0	0
13	Zr-95	2,060E+04	6,860E+02	2,290E+00	0	0
14	Zr-97	1,900E+04	5,960E+02	2,160E+00	0	0
15	Nb-95	2,030E+04	6,750E+02	2,250E+00	0	0
16	Mo-99	1,190E+05	4,670E+03	4,770E+00	0	0
17	Tc-99m	1,080E+05	4,370E+03	4,280E+00	0	0
18	Ru-103	9,440E+04	3,770E+03	3,780E+00	0	0
19	Ru-105	4,870E+04	1,540E+03	2,100E+00	0	0
20	Ru-106	1,560E+04	6,240E+02	6,240E-01	0	0
21	Rh-105	5,450E+04	2,170E+03	2,180E+00	0	0
22	Sb-127	8,480E+04	3,930E+03	2,660E+00	1,330E-04	1,330E-05
23	Sb-129	2,070E+05	7,640E+03	7,010E+00	3,790E-04	3,790E-05
24	Te-127	8,340E+04	3,910E+03	2,600E+00	1,300E-04	1,300E-05
25	Te-127m	9,530E+03	4,470E+02	2,980E-01	1,490E-05	1,490E-06
26	Te-129	2,420E+05	9,650E+03	7,840E+00	4,010E-04	4,010E-05
27	Te-129m	3,830E+04	1,790E+03	1,200E+00	5,990E-05	5,990E-06
28	Te-131m	1,170E+05	5,290E+03	3,690E+00	1,870E-04	1,870E-05
29	Te-132	1,190E+06	5,490E+04	3,730E+01	1,870E-03	1,870E-04
30	I-131	5,870E+05	3,890E+03	2,610E+02	1,310E-01	1,310E-02
31	I-132	8,500E+05	5,610E+03	3,780E+02	1,900E-01	1,900E-02
32	I-133	1,160E+06	7,360E+03	5,240E+02	2,670E-01	2,670E-02
33	I-134	4,080E+05	8,320E+02	2,690E+02	2,000E-01	2,000E-02
34	I-135	9,680E+05	5,510E+03	4,540E+02	2,390E-01	2,390E-02
35	Xe-133	2,620E+06	2,360E+06	1,570E+04	7,860E+00	7,860E-01
36	Xe-135	6,270E+05	6,960E+05	3,400E+03	1,490E+00	1,490E-01
37	Cs-134	3,320E+04	4,460E+02	4,960E-01	2,980E-02	2,980E-03
38	Cs-136	2,150E+04	2,880E+02	3,210E-01	1,930E-02	1,930E-03
39	Cs-137	3,530E+04	4,740E+02	5,270E-01	3,160E-02	3,160E-03
40	Ba-140	1,650E+05	2,350E+03	2,360E+00	2,370E-05	2,370E-06
41	La-140	2,220E+04	7,390E+02	2,470E+00	0	0
42	Ce-141	2,030E+04	6,760E+02	2,260E+00	0	0
43	Ce-143	1,820E+04	5,890E+02	2,050E+00	0	0
44	Ce-144	9,990E+03	3,330E+02	1,110E+00	0	0
45	Pr-143	1,840E+04	6,120E+02	2,040E+00	0	0
46	Nd-147	7,930E+03	2,630E+02	8,830E-01	0	0
47	Np-239	2,300E+05	7,520E+03	2,570E+01	0	0
48	Pu-238	3,780E+00	1,260E-01	4,200E-04	0	0
49	Pu-239	2,270E+00	7,570E-02	2,520E-04	0	0
50	Pu-240	2,490E+00	8,310E-02	2,770E-04	0	0
51	Pu-241	5,390E+02	1,800E+01	5,990E-02	0	0
52	Am-241	2,010E-01	6,700E-03	2,230E-05	0	0
53	Cm-242	5,020E+01	1,670E+00	5,580E-03	0	0
54	Cm-244	9,540E-01	3,180E-02	1,060E-04	0	0

Em virtude da não existência de dados horários anuais de velocidade do vento, na presente análise optou-se por utilizar uma velocidade do vento única, válida para todos os intervalos espaciais. Desse modo, por meio da utilização dos dados referentes à distribuição e frequência da direção do vento e às velocidades médias do vento (condicionais à direção), apresentados na referência /47/, calculou-se a velocidade média do vento representativa para a região, que foi de 3,1 m/s. Este valor corresponde à média das velocidades do vento ponderada pelas frequências de direção do vento.

Na referência /47/ é apresentada a distribuição mensal do número de dias favoráveis e desfavoráveis à dispersão de poluentes na atmosfera para o ano de 1985, onde observou-se 74,8% de dias favoráveis à dispersão e 25,2% de dias desfavoráveis, sendo que os meses de maio a agosto contêm a maior parte dos dias desfavoráveis à dispersão. Em vista disso, optou-se por considerar três cenários distintos quanto à estabilidade atmosférica, a saber:

- 1) Cenário representativo de condições típicas de inverno, com categoria de estabilidade atmosférica de Pasquill = D e velocidade média do vento = 3,1 m/s;
- 2) Cenário que considera as situações extremas, mais desfavoráveis, que possam ocorrer no Inverno, com categoria de estabilidade atmosférica de Pasquill = F e velocidade média do vento = 3,1 m/s;
- 3) Cenário representativo de condições típicas de verão, com categoria de estabilidade atmosférica de Pasquill = B e velocidade média do vento = 3,1 m/s.

No mesmo documento, é apresentada uma distribuição mensal das bases das inversões térmicas para o ano de 1985, onde observou-se que mais de 50% das inversões ocorreram a alturas maiores que 600 metros. No presente trabalho, considerou-se uma altura de mistura de 1.000 metros, que foi utilizada para as

condições instáveis e neutras (categorias de estabilidade B e D). Para a categoria de estabilidade F considerou-se uma altura de mistura igual a zero, uma vez que o modelo utilizado no CRAC2 não considera altura de mistura para condições estáveis.

Das precipitações pluviométricas máximas em 24 horas, para a Cidade Universitária (período de 1974 a 1985), apresentadas na referência /47/, observou-se que a precipitação máxima em 24 horas no local, para o verão, ocorreu no mês de fevereiro de 1983, e foi de 117,1 mm, enquanto que para o inverno ocorreu no mês de junho de 1978, e foi de 68,3 mm. Uma vez que os dados de entrada devem ser fornecidos na forma de taxa de precipitação, na presente análise considerou-se que estas precipitações ocorreram de maneira homogênea, durante as 24 horas. Desse modo, considerou-se as taxas de precipitação de 4,88 mm/h e de 2,85 mm/h, para o verão e o inverno, respectivamente.

Conforme mencionado na seção 2.7, na avaliação dos efeitos na saúde do homem considera-se a distribuição de população por setor. Nos resultados finais, são consideradas as frequências de direção do vento, conforme definidas na rosa-dos-ventos.

Uma vez que a distribuição de população utilizada neste trabalho considera um conjunto de 16 setores de direção do vento, cada um com largura de $22,5^\circ$, a rosa-dos-ventos deve apresentar as frequências de direção do vento para os mesmos 16 setores. Contudo, a rosa-dos-ventos apresentada na referência /47/, que considerou o período de 1974 a 1983, apresenta as frequências de direção do vento para apenas 8 setores, com largura de 45° cada um (ver Tabela 3.4). Em vista disso, os dados de frequência de direção do vento utilizados neste trabalho foram gerados supondo-se que as frequências médias anuais apresentadas na Tabela 3.4 estavam distribuídas uniformemente em cada setor de 45° . Desse modo, foram gerados dados de frequência de direção do vento para os 16 setores considerados, conforme são apresentados na Tabela 3.5.

Foram definidas as seguintes situações para análise:

Tabela 3.4 Distribuição de freqüência da direção do vento, por ano e por setor, para o período de 1974 a 1983, conforme apresentada no RAS do reator IPEN-MB-01 /47/.

Ano	Freqüência de Vento por Setor (%)								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calmo
1974	3,2	6,2	6,2	45,4	8,7	3,8	2,1	23,1	1,3
1975	3,9	3,9	6,5	46,9	10,2	2,9	2,2	21,9	1,6
1976 *	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1977	6,7	3,3	6,9	36,0	12,9	1,4	5,1	19,9	5,1
1978	7,5	3,9	10,8	38,8	13,8	1,8	3,9	17,3	2,2
1979	6,0	2,9	8,7	41,5	13,6	1,5	4,4	20,3	1,1
1980	5,7	5,3	13,7	39,2	5,1	1,5	6,0	22,6	1,0
1981	4,3	4,1	12,8	42,1	7,5	1,3	5,6	20,8	1,5
1982	6,0	3,3	11,1	37,5	9,9	1,3	4,5	23,3	3,1
1983	6,0	6,1	15,3	31,0	6,0	1,2	8,7	23,8	1,4
Média	5,5	4,3	10,5	39,8	9,7	1,8	4,7	21,4	2,0

* Não foram fornecidos os dados referentes ao ano de 1976.

Tabela 3.5 Freqüência média anual da direção do vento por setores considerados na análise.

Setores	Freqüência (%)
N	2,750
NNE	2,450
NE	2,150
ENE	3,700
E	5,250
ESE	12,575
SE	19,900
SSE	12,375
S	4,850
SSW	2,875
SW	0,900
WSW	1,625
W	2,350
WNW	6,525
NW	10,700
NNW	6,725

MET1-Não há ocorrência de precipitação;

Categoria de estabilidade atmosférica - D;

Velocidade do vento = 3,1 m/s.

MET2-Não há ocorrência de precipitação;

Categoria de estabilidade atmosférica - F;

Velocidade do vento = 3,1 m/s.

MET3-Não há ocorrência de precipitação;

Categoria de estabilidade atmosférica - B;

Velocidade do vento = 3,1 m/s.

MET4-Ocorrência de precipitação em todos os intervalos espaciais;

Categoria de estabilidade atmosférica - D;

Velocidade do vento = 3,1 m/s;

Intensidade de precipitação - 2,85 mm/hora.

MET5-Ocorrência de precipitação em todos os intervalos espaciais;

Categoria de estabilidade atmosférica - F;

Velocidade do vento = 3,1 m/s;

Intensidade de precipitação - 2,85 mm/hora.

MET6-Ocorrência de precipitação em todos os intervalos espaciais;

Categoria de estabilidade atmosférica - B;

Velocidade do vento = 3,1 m/s;

Intensidade de precipitação - 4,88 mm/hora.

MET7-Ocorrência de precipitação nos intervalos espaciais 1 e 2;

Categoria de estabilidade atmosférica - D;

Velocidade do vento = 3,1 m/s;

Intensidade de precipitação - 2,85 mm/hora.

MET8-Ocorrência de precipitação nos intervalos espaciais 1 e 2;

Categoria de estabilidade atmosférica - F;

Velocidade do vento = 3,1 m/s;

Intensidade de precipitação - 2,85 mm/hora.

MET9-Ocorrência de precipitação nos intervalos espaciais 1 e 2;

Categoria de estabilidade atmosférica - B;

Velocidade do vento = 3,1 m/s;

Intensidade de precipitação - 4,88 mm/hora.

MET10-Ocorrência de precipitação nos intervalos espaciais 1 a 6;

Categoria de estabilidade atmosférica - D;

Velocidade do vento = 3,1 m/s;

Intensidade de precipitação - 2,85 mm/hora.

MET11-Ocorrência de precipitação nos intervalos espaciais 1 a 6;

Categoria de estabilidade atmosférica - F;

Velocidade do vento = 3,1 m/s;

Intensidade de precipitação - 2,85 mm/hora.

MET12-Ocorrência de precipitação nos intervalos espaciais 1 a 6;

Categoria de estabilidade atmosférica - B;

Velocidade do vento = 3,1 m/s;

Intensidade de precipitação - 4,88 mm/hora.

É importante notar que as situações **METS**, **METB** e **MET11** foram postuladas apenas para efeito de análise, uma vez que a ocorrência de precipitação com categoria de estabilidade atmosférica **F** é um evento pouco provável.

3.5 Distribuição Populacional

Na presente análise considerou-se duas situações distintas com relação à localização do sítio do reator:

- Reator localizado no sítio do IPEN, próximo a um grande centro populacional;
- Reator localizado numa área com características demográficas típicas de uma região rural (do estado de São Paulo).

Para cada uma dessas situações, foi adotada uma distribuição populacional

para uma área com raio de 75 km, a partir do reator. Este valor foi adotado considerando-se que normas de preparação para Relatórios de Análise do Local, tais como Guia Regulamentar 4.2 /48/, recomendam que a avaliação do impacto na população devido liberações de radionuclídeos seja feita considerando-se que a população esteja distribuída numa área com raio de até 50 milhas, a partir do reator.

Em ambos os casos, esta área foi dividida em 10 anéis radiais que foram chamados de intervalos espaciais, e em 16 setores (os mesmos que os utilizados na rosa-dos-ventos), cada um com $22,5^\circ$, tendo como bissetriz os pontos cardeais, conforme é mostrado na Figura 3.1. Os raios externos, em km, de cada um dos 10 intervalos espaciais, são: 1,5; 3,0; 4,5; 6,0; 8,0; 15,0; 30,0; 45,0; 60,0 e 75,0.

Na distribuição que considera o sítio localizado próximo a um grande centro populacional, tomou-se como referência a cidade de São Paulo, com o reator localizado no sítio do IPEN. Esta distribuição é apresentada na Tabela 3.6. Os dados demográficos foram obtidos do RAS do Reator IPEN-MB-01 /47/ e do censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 1980 /49/. A população distribuída na área considerada totalizou cerca de 14 milhões de habitantes.

A segunda distribuição considerou uma área com características demográficas representativas de uma região rural do estado de São Paulo, onde foram adotados dados populacionais hipotéticos. Esta distribuição é mostrada na Tabela 3.7. A população considerada totalizou cerca de 3,5 milhões de habitantes.

A exemplo do trabalho de Aldrich et alii /37/, foram estudadas nesta dissertação diferentes distribuições populacionais, que são apresentadas a seguir:

POP1-Distribuição "real", que corresponde à distribuição populacional apresentada na Tabela 3.6 ou na Tabela 3.7 (depende da situação analisada);

POP2-Distribuição homogênea (densidade de população uniforme);

POP3-Toda a população encontra-se distribuída em um único setor (no caso, o setor 1);

POP4-Centro populacional com 10.000 habitantes num único setor do intervalo espacial 2, com a população restante distribuída homogeneamente nos intervalos espaciais de 4 a 10;

POP5-Centro populacional com 20.000 habitantes num único setor do intervalo espacial 3, com a população restante distribuída homogeneamente nos intervalos espaciais de 5 a 10;

POP6-Centro populacional com 30.000 habitantes num único setor do intervalo espacial 4, com a população restante distribuída homogeneamente nos intervalos espaciais de 6 a 10;

POP7-Centro populacional com 50.000 habitantes num único setor do intervalo espacial 5, com a população restante distribuída homogeneamente nos intervalos espaciais de 7 a 10;

POP8-Centro populacional com 150.000 habitantes num único setor do intervalo espacial 7, com a população restante distribuída homogeneamente nos intervalos espaciais de 9 a 10;

POP9-Centro populacional com 1.000.000 de habitantes num único setor do intervalo espacial 8, com a população restante distribuída homogeneamente no intervalo espacial 10.

As distribuições relacionadas acima encontram-se representadas na Figura

3.2.

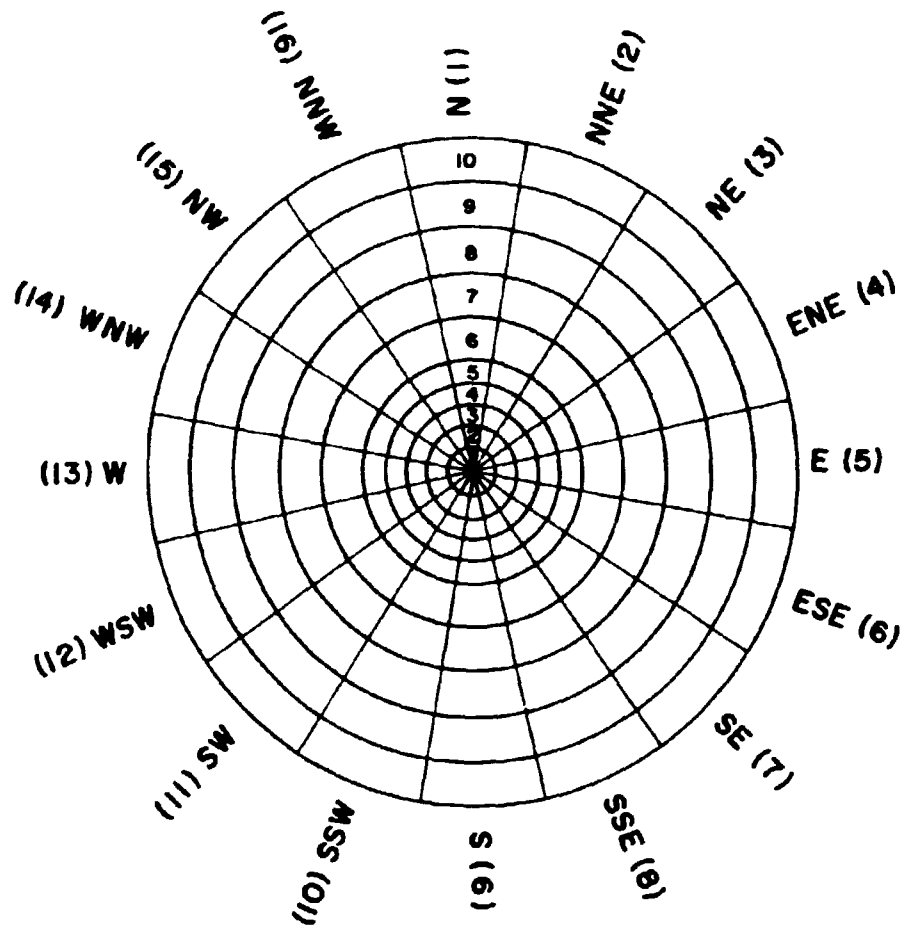


Figura 3.1 Representação dos intervalos espaciais e dos setores da área considerada na análise.

Tabela 3.6 Distribuição populacional na área com 75 km de raio, ao redor do sítio do IPEN.

Distância (km)	Setores							
	N (1)	NNE (2)	NE (3)	ENE (4)	E (5)	ESE (6)	SE (7)	SSE (8)
0,0 - 1,5	2.801	3.854	3.854	3.854	3.854	3.854	3.780	4.012
1,5 - 3,0	6.122	8.120	8.500	10.625	11.727	10.777	9.737	11.050
3,0 - 4,5	4.030	8.208	15.842	19.789	24.423	23.485	14.997	15.847
4,5 - 6,0	12.721	15.965	40.861	63.355	41.748	35.473	16.848	16.497
6,0 - 8,0	70.312	70.311	70.311	70.311	70.311	70.311	70.311	70.311
8,0 - 15,0	404.288	404.289	404.289	404.289	404.288	404.289	404.289	404.289
15,0 - 30,0	13.749	13.749	355.272	177.636	55.107	102.908	655.706	425.780
30,0 - 45,0	19.261	2.805	5.877	84.434	101.067	28.243	48.346	78.652
45,0 - 60,0	38.522	12.722	9.666	19.331	198.081	1.000	416.784	257.209
60,0 - 75,0	84.085	13.740	4.381	130.873	13.379	1.000	151.098	0

Distância (km)	Setores							
	S (9)	SSW (10)	SW (11)	WSW (12)	W (13)	WNW (14)	NW (15)	NNW (16)
0,0 - 1,5	4.182	4.253	4.292	4.292	4.264	4.160	3.317	5.180
1,5 - 3,0	11.582	11.844	13.174	13.174	13.174	12.704	8.829	7.856
3,0 - 4,5	17.998	17.023	15.202	16.064	19.047	18.005	16.448	12.162
4,5 - 6,0	25.143	20.746	11.825	9.185	24.925	25.153	25.117	23.071
6,0 - 8,0	70.311	70.311	70.311	70.311	70.311	70.311	70.311	70.311
8,0 - 15,0	404.288	404.289	404.289	404.289	404.288	404.289	404.289	404.289
15,0 - 30,0	228.594	32.547	30.358	160.859	733.296	37.661	12.533	63.243
30,0 - 45,0	1.000	21.028	30.358	1.000	53.325	14.885	21.941	50.297
45,0 - 60,0	4.960	1.000	6.250	1.000	80.391	5.862	258.773	40.037
60,0 - 75,0	4.961	27.481	6.250	15.893	1.000	5.863	10.209	63.277

Tabela 3.7 Distribuição populacional na área com 75 km de raio, ao redor do sítio do reator, numa região rural.

Distância (km)	Setores							
	N (1)	NNE (2)	NE (3)	ENE (4)	E (5)	ESE (6)	SE (7)	SSE (8)
0,0 - 1,5	9	9	9	9	9	9	9	9
1,5 - 3,0	28	28	28	28	28	28	28	28
3,0 - 4,5	41	43	41	41	47	47	47	47
4,5 - 6,0	42	47	56	43	46	60	67	67
6,0 - 8,0	79	95	99	76	64	71	103	114
8,0 - 15,0	446	545	739	508	420	360	373	545
15,0 - 30,0	2.066	29.475	2.612	2.874	12.569	8.332	426.226	2.721
30,0 - 45,0	9.532	5.174	61.267	89.351	6.710	39.371	9.599	26.156
45,0 - 60,0	34.683	23.150	79.826	19.332	15.797	54.077	27.005	11.018
60,0 - 75,0	276.671	272.210	846.313	355.501	175.252	196.957	5.598	5.996

Distância (km)	Setores							
	S (9)	SSW (10)	SW (11)	WSW (12)	W (13)	WNW (14)	NW (15)	NNW (16)
0,0 - 1,5	9	9	9	9	9	9	9	9
1,5 - 3,0	28	28	28	28	28	28	28	28
3,0 - 4,5	47	47	47	47	47	47	47	43
4,5 - 6,0	67	67	67	67	67	67	58	45
6,0 - 8,0	116	106	124	123	120	109	79	73
8,0 - 15,0	1.888	790	656	759	775	925	5.481	413
15,0 - 30,0	16.344	2.900	2.260	8.391	2.774	64.390	2.058	15.970
30,0 - 45,0	5.601	2.766	5.255	4.012	4.240	10.776	3.568	39.221
45,0 - 60,0	4.585	14.696	4.357	89.459	6.977	8.208	16.498	18.931
60,0 - 75,0	5.295	4.461	17.063	7.017	4.439	7.071	4.774	6.688

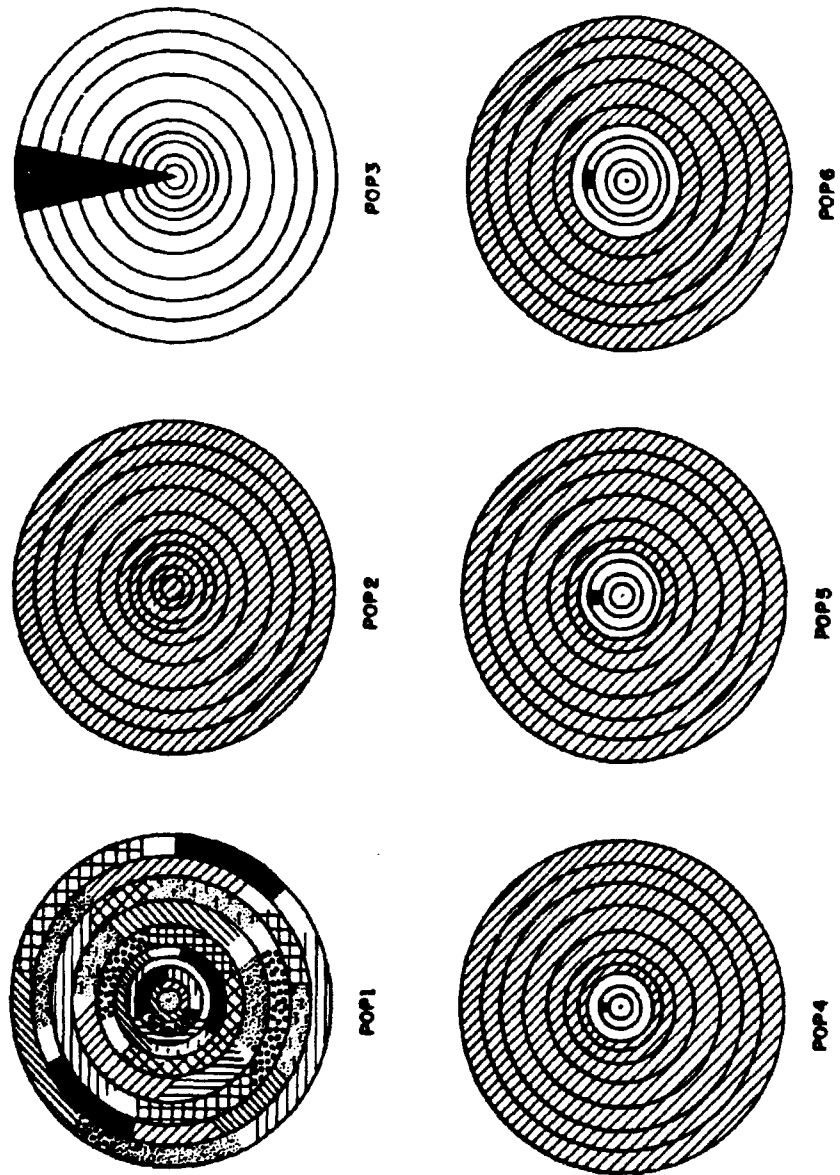


Figura 3.2 Representação esquemática das nove distribuições populacionais consideradas na análise.

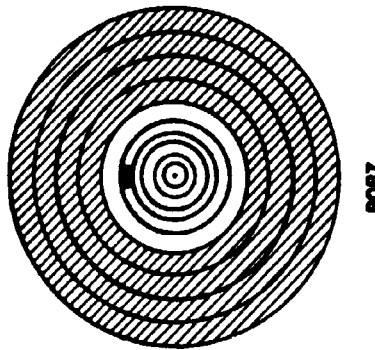
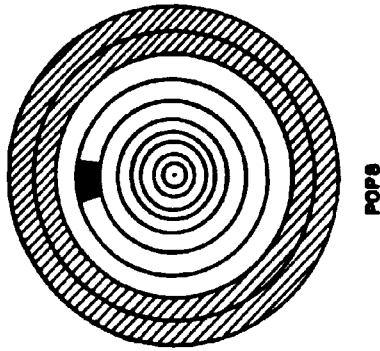
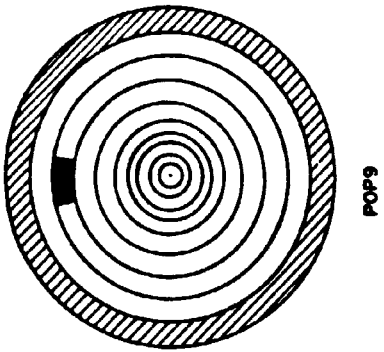


Figura 3.2 (Continuação)

3.6 Análise dos Resultados

Uma vez definidos os dados essenciais para a realização da análise de conseqüências, passa-se à fase em que será avaliada a influência de fatores tais como termo-fonte, condição meteorológica e distribuição populacional nos resultados da análise.

Os resultados gerados pela análise de conseqüências consistem da magnitude de conseqüências específicas e suas probabilidades.

Dado um termo-fonte, as magnitudes das conseqüências são previstas para uma variedade de condições meteorológicas e de direções do vento, cujas probabilidades são estimadas com base em dados meteorológicos observados. Desse modo, os resultados gerados pela análise de conseqüências são de natureza probabilística, refletindo as probabilidades de ocorrência do acidente, de direção do vento e de condições meteorológicas. A probabilidade associada a uma conseqüência específica é dada pela multiplicação das probabilidades de ocorrência do acidente, de condições meteorológicas e de direção do vento especificadas. Assim, dado um termo-fonte, a análise gera resultados para todas as possíveis combinações de condições meteorológicas e de direções do vento.

O resultado da análise para cada conseqüência específica é apresentado na forma de uma função da magnitude desta conseqüência, definida como a probabilidade de que uma dada magnitude para esta conseqüência seja igualada ou excedida. Esta função é denominada Função de Distribuição Acumulada Complementar (CCDF), sendo utilizada como uma medida do risco ao público. Por esse motivo, esta função é frequentemente denominada "curva de risco". Na representação gráfica de uma CCDF emprega-se normalmente escala logarítmica em ambos os eixos.

No caso específico do presente estudo, as conseqüências foram calculadas considerando-se a ocorrência de um termo-fonte específico (com probabilidade 1) e de uma condição meteorológica que se mantém constante durante toda a liberação. Foram considerados os 16 setores da rosa-dos-ventos, sendo que a probabilidade de

que o vento sopra em cada uma dessas 16 direções (e não muda durante toda a liberação) é estimada pela frequência de direção do vento observada.

Nessas condições, a CCDF para uma dada magnitude C_0 é calculada da seguinte maneira /50/:

$$\eta(C_0) = \sum_i \delta_i \lambda_i \quad (26)$$

onde:

λ_i = probabilidade do vento soprar na direção i (e não mudar durante toda a liberação);

δ_i = função utilizada para avaliar a CCDF, onde

$$\delta_i = 0 \text{ para } C_i < C_0 ,$$

$$\delta_i = 1 \text{ para } C_i \geq C_0 ,$$

e C_i é a magnitude da consequência calculada sob a hipótese de que o vento sopra na direção i e não muda durante toda a liberação.

Os seguintes resultados estatísticos podem ser obtidos de uma CCDF:

- O valor médio da magnitude da consequência, que é dado por /50/:

$$\langle C \rangle = \sum_i C_i \lambda_i \quad (27)$$

Este valor corresponde à integral da CCDF.

- O valor correspondente à maior magnitude calculada para a consequência, que no presente estudo foi denominado de valor máximo.

Na presente análise, foram considerados os seguintes tipos de consequências radiológicas:

- mortes imediatas;
 - mortes devidas a câncer latente, calculadas considerando-se órgãos individuais (excluindo a tireóide);
 - nódulos (benignos e malignos) na tireóide.
-

3.6.1 Influência do Termo-Fonte

Foi analisada a influência de termos-fonte distintos, com o reator localizado numa área urbana. Para todos os casos analisados considerou-se a distribuição populacional POP1 (ver Tabela 3.6) e as condições meteorológicas correspondentes a MET4, com o reator situado no sítio do IPEN. A opção por MET4 deveu-se a uma análise preliminar, onde observou-se que os casos envolvendo esta condição apresentaram o maior número de mortes imediatas. Foram utilizados os cinco termos-fonte definidos na seção 3.3.

- Mortes Imediatas

Na Tabela 3.8, são apresentados os valores médios e máximos do número de mortes resultantes de exposição imediata, que foram denominadas mortes imediatas. Os resultados obtidos são condicionais à ocorrência de cada um dos cinco termos-fonte considerados (probabilidade de ocorrência igual a 1).

Tabela 3.8 Valores médios e máximos para o número de mortes imediatas, condicionais aos termos-fonte SST1 a SST5. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4).

Termo-Fonte	Mortes Imediatas	
	Média	Máximo
SST1	5.070	5.560
SST2	0	0
SST3	0	0
SST4	0	0
SST5	0	0

Da Tabela 3.8, observou-se que, com exceção do termo-fonte SST1, não houve mortes imediatas devidas a ocorrência dos termos-fonte SST2 a SST5, uma vez que as liberações geradas por estes termos-fonte resultaram em doses imediatas bem

abaixo do limiar de dose para este tipo de consequência (o limiar de dose para a ocorrência de mortes imediatas é de 3,2 Sv, para a medula óssea /1/, /8/).

Observou-se que a ocorrência de mortes imediatas ficou restrita à distância máxima de 1,5 km da instalação, a qual equivale ao raio do intervalo espacial 1.

Na Figura 3.3 são apresentados os valores médios das doses resultantes de exposição imediata na medula óssea, em função da distância, para cada termo-fonte. Observou-se que a variação entre as magnitudes das doses relativas aos termos-fontes SST1 e SST5 foi da ordem aproximada de 9×10^7 , sendo que SST1 excede SST2, SST3 e SST4 segundo fatores de 4×10^1 , 4×10^3 e 5×10^6 , respectivamente.

- Mortes Devidas a Câncer Latente

Na Tabela 3.9 são apresentados os valores médios e máximos do número de mortes devidas a câncer latente. As curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente são apresentadas na Figura 3.4. Os resultados são condicionais à ocorrência de cada um dos cinco termos-fonte considerados.

Observou-se que a variação máxima entre as magnitudes dos números de mortes devidas a câncer latente foi da ordem aproximada de 7×10^5 para os valores médios e de 8×10^5 para os valores máximos. Tornou-se evidente que as ocorrências mais significativas foram devidas aos acidentes com os termos-fonte SST1 e SST2, apesar de que, ao contrário do ocorrido com as mortes imediatas, todos os termos-fonte, sem exceção, apresentaram magnitudes diferentes de zero. Isto deve-se a que, de acordo com o modelo utilizado para a previsão do número de mortes devidas a câncer latente (ver item 2.7.2), a ocorrência deste tipo de consequência depende diretamente do número de pessoas que estão sujeitas à altas ou baixas doses ou taxas de dose, não existindo, a exemplo do que ocorre para as mortes imediatas, um limiar de dose, podendo este tipo de consequência ocorrer a grandes distâncias do reator.

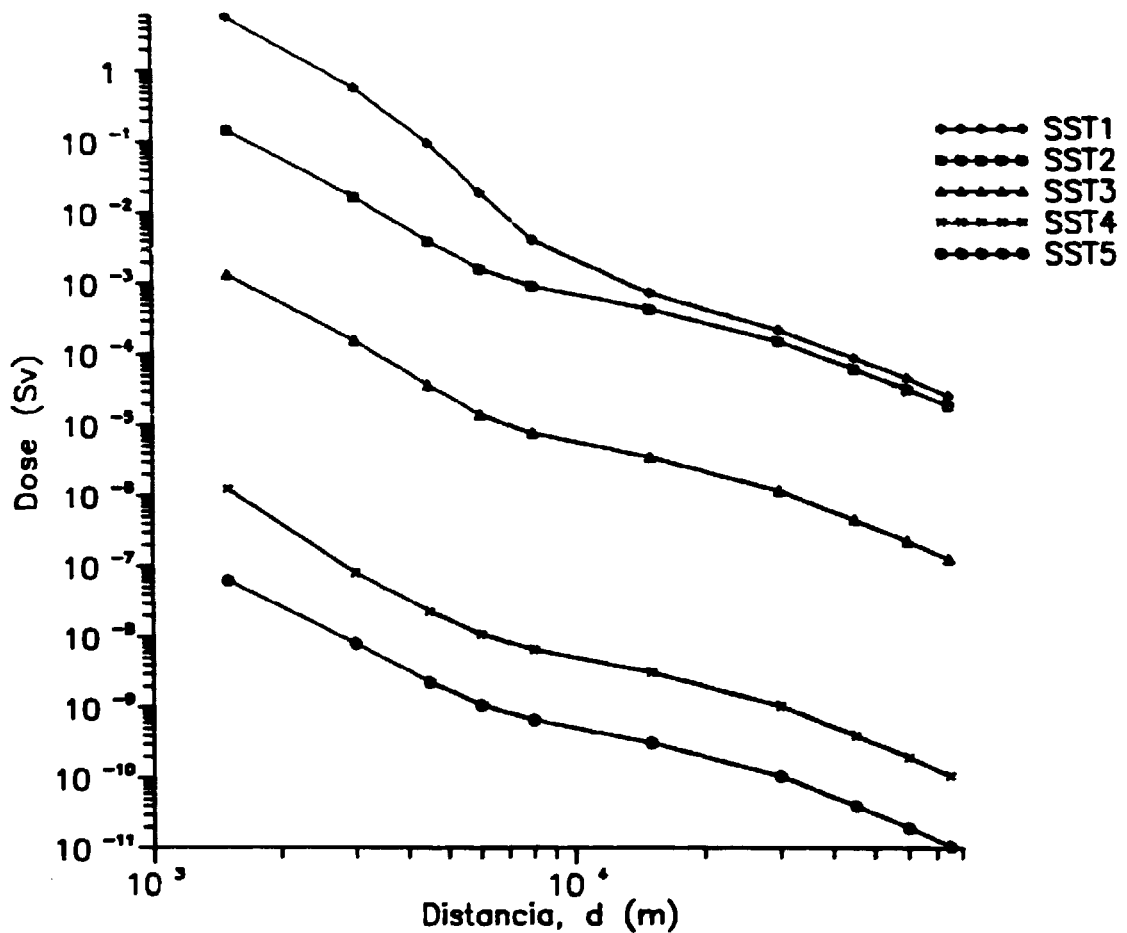


Figura 3.3 Valores médios para doses imediatas na medula óssea, em função da distância, condicionais aos termos-fonte SST1 a SST5. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4)

- Nódulos na Tireóide

Na Tabela 3.10 são apresentados os valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide. As curvas CCDF para esta variável são apresentadas na Figura 3.5. Os resultados são condicionais à ocorrência de cada um dos cinco termos-fonte.

Com relação ao número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, observou-se um comportamento semelhante ao do número de mortes devidas a câncer latente. A variação máxima entre as magnitudes foi da ordem aproximada de $2,6 \times 10^6$.

tanto para os valores médios quanto para os valores máximos.

Tabela 3.9 Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, condicionais aos termos-fonte SST1 a SST5. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4).

Termo-Fonte	Mortes devidas a câncer latente	
	Média	Máximo
SST1	424	543
SST2	50	58,4
SST3	$3,08 \times 10^{-1}$	$3,41 \times 10^{-1}$
SST4	$6,36 \times 10^{-3}$	$7,18 \times 10^{-3}$
SST5	$6,22 \times 10^{-4}$	$7,06 \times 10^{-4}$

- Risco ao Público

O risco de uma consequência indesejada devido a ocorrência de eventos, no exercício de uma atividade ou na aplicação de uma tecnologia, pode ser entendido como uma medida do potencial de manifestações desta consequência indesejada, decorrente do exercício da atividade ou da aplicação da tecnologia considerada /51/.

Neste estudo é considerado o risco de consequências indesejadas devido a acidentes em instalações nucleares, em termos de danos à saúde do homem. Este risco é expresso na forma de risco social e de risco individual.

Do ponto de vista quantitativo, o risco social de uma consequência indesejada devido a um determinado evento (acidente) é definido da seguinte maneira /5/:

$$\text{Risco Social} \left(\frac{\text{Consequências}}{\text{unidade de tempo}} \right) = \text{Frequência} \left(\frac{\text{eventos}}{\text{unidade de tempo}} \right) \times \text{Magnitude} \left(\frac{\text{consequências}}{\text{evento}} \right)$$

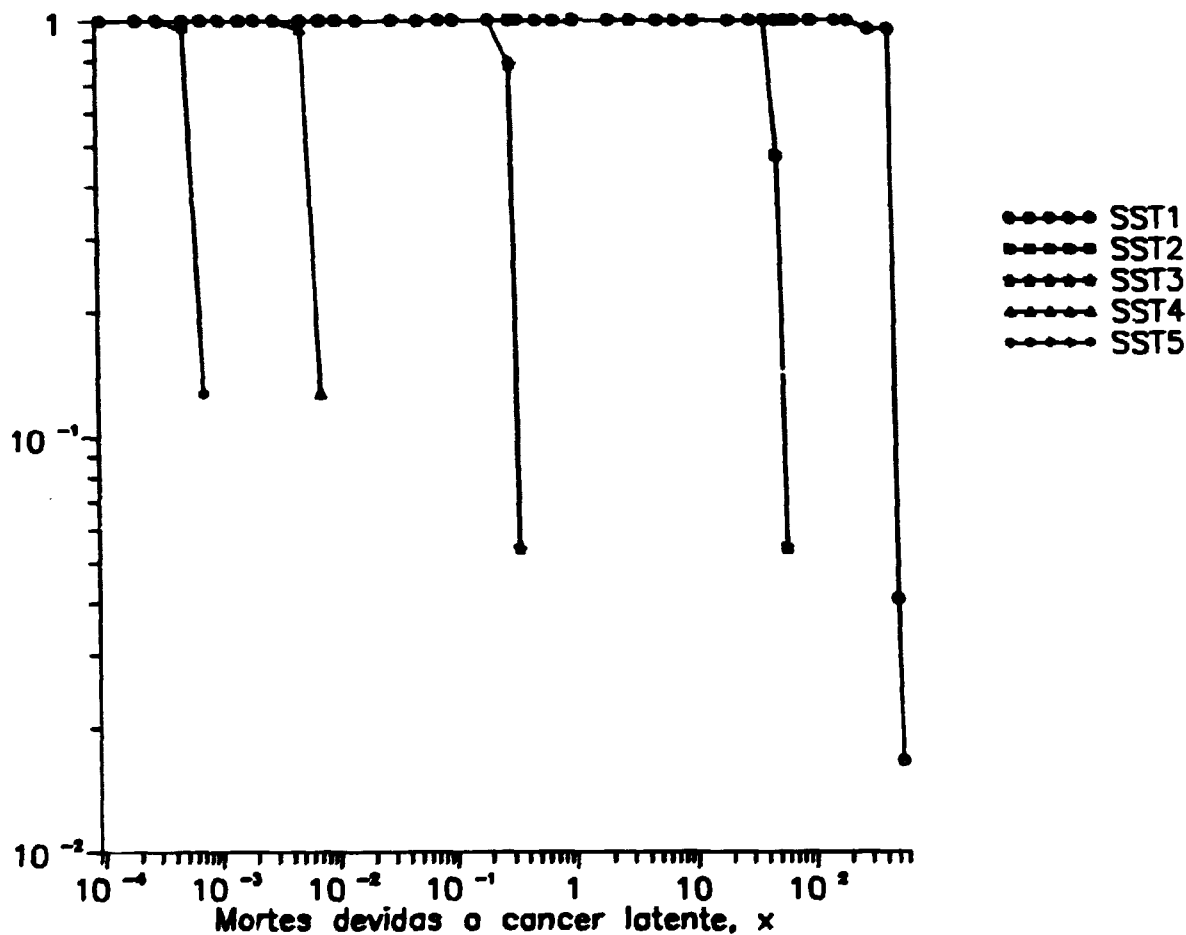


Figura 3.4 Curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente, condicionais aos termos-fonte SST1 a SST5. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4)

Em termos de danos à saúde, o valor do risco social definido acima expressa o número de pessoas da população exposta ao risco que é atingida pela consequência indesejada, por unidade de tempo (mortes imediatas/ano, por exemplo), como resultado de ocorrências de um determinado evento.

O risco individual pode ser entendido como a probabilidade de que um indivíduo exposto ao risco seja atingido pela consequência indesejada em uma

unidade de tempo.

Tabela 3.10 Valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, condicionais aos termos-fonte SST1 a SST5. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4)

Termo-Fonte	Nódulos na Tireóide	
	Média	Máximo
SST1	1.440	1.670
SST2	154	174
SST3	2,36	2,59
SST4	$5,75 \times 10^{-3}$	$6,51 \times 10^{-3}$
SST5	$5,61 \times 10^{-4}$	$6,35 \times 10^{-4}$

O risco individual de uma consequência indesejada devido a um determinado evento é definido da seguinte maneira:

$$\text{Risco Individual} \left(\frac{\text{Consequências}}{\text{pessoa.unidade de tempo}} \right) = \frac{\text{Frequência} \left(\frac{\text{Consequências}}{\text{unid. tempo}} \right)}{\text{população exposta ao risco}}$$

Os resultados obtidos anteriormente, em termos do número de mortes imediatas, do número de mortes devidas a câncer latente e do número de nódulos na tireóide, são condicionais à ocorrência de cada um dos cinco termos-fonte considerados.

Para o cálculo dos riscos considerou-se as frequências anuais de ocorrência de cada termo-fonte (ver item 3.3) e os valores médios de cada consequência.

Na Tabela 3.11 são apresentados os riscos sociais e individuais de mortes imediatas resultantes da ocorrência dos termos-fonte SST1 a SST5. Conforme

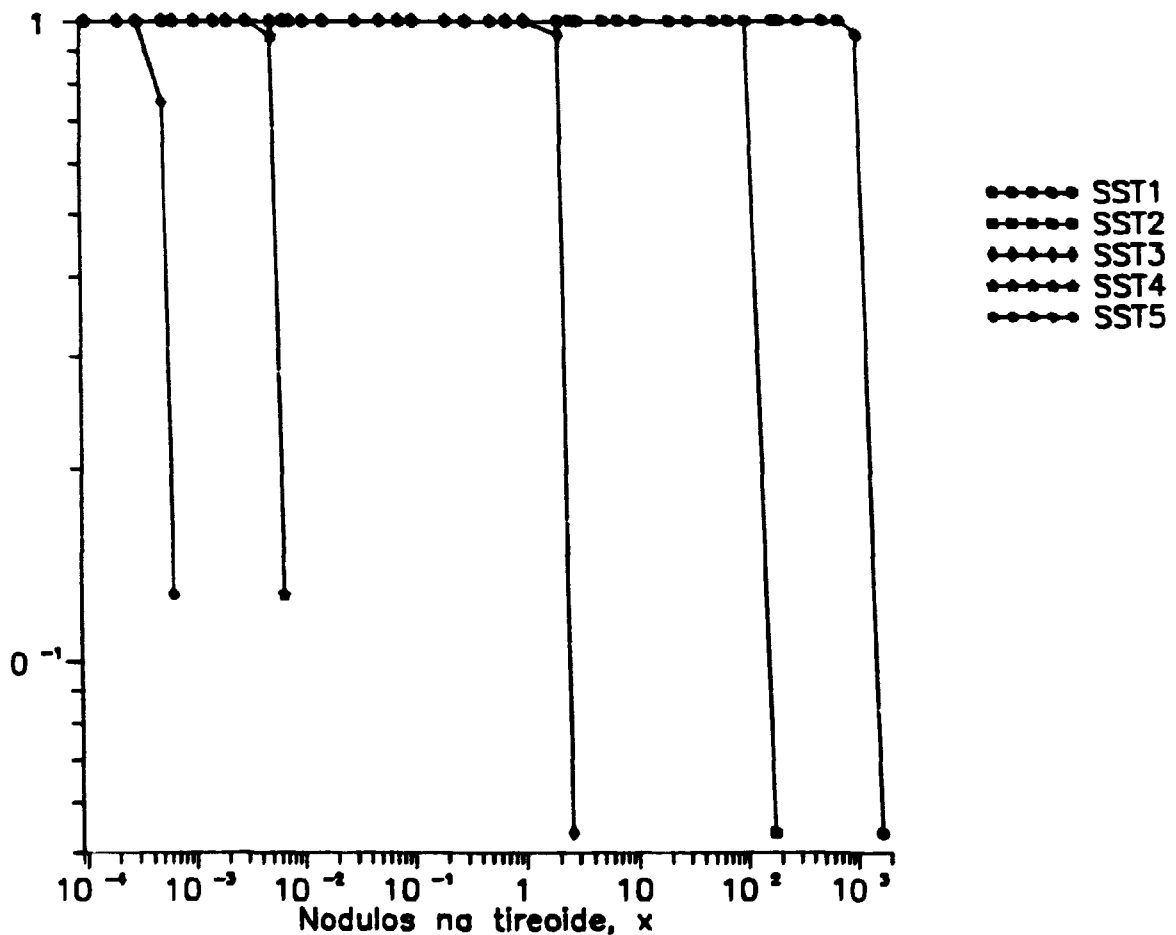


Figura 3.5 Curvas CCDF para o número de nódulos na tireoide, condicionais aos termos-fonte SST1 a SST5. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4)

observado anteriormente, a ocorrência de mortes imediatas é esperada somente à distância máxima de 1,5 km da instalação, a qual equivale ao raio do intervalo espacial 1. Desse modo, o cálculo do risco individual tomou por base a população existente no referido intervalo, que é de 63.803 habitantes.

Observou-se que somente o termo-fonte SST1 produziria risco social e individual.

Na Tabela 3.12 são apresentados os riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos termos-fonte SST1 a SST5. No cálculo do

risco individual foi considerada a população existente na área com 75 km de raio, que totaliza cerca de 14 milhões de habitantes.

Tabela 3.11 Riscos sociais e individuais de mortes imediatas resultantes dos termos-fonte SST1 a SST5. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4)

Termo-Fonte	Risco Social (n.º esperado de mortes imediatas / ano)	Risco Individual (n.º esperado de mortes imediatas/pessoa.ano)
SST1	$5,07 \times 10^{-2}$	$7,95 \times 10^{-7}$
SST2	0	0
SST3	0	0
SST4	0	0
SST5	0	0

Tabela 3.12 Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos termos-fonte SST1 a SST5. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4)

Termo-Fonte	Risco Social (n.º esperado de mortes devidas a câncer latente / ano)	Risco Individual (n.º esperado de mortes devidas a câncer latente / pessoa.ano)
SST1	$4,24 \times 10^{-3}$	$3,03 \times 10^{-10}$
SST2	$1,00 \times 10^{-3}$	$7,14 \times 10^{-11}$
SST3	$3,08 \times 10^{-5}$	$2,20 \times 10^{-12}$
SST4	$6,36 \times 10^{-7}$	$4,54 \times 10^{-14}$
SST5	$6,22 \times 10^{-8}$	$4,44 \times 10^{-15}$

É importante observar que, segundo o RSS /5/, a maior parte das mortes devidas a câncer latente são esperadas de 10 a 40 anos após a ocorrência do acidente.

Da Tabela 3.12 observou-se que a maior variação entre os riscos sociais e entre os riscos individuais de mortes devidas a câncer latente foi da ordem de aproximadamente 7×10^4 .

Na Tabela 3.13 são apresentados os riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide, resultantes dos termos-fonte SST1 a SST5.

Tabela 3.13 Riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide resultantes dos termos-fonte SST1 a SST5. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4)

Termo-Fonte	Risco Social (n° esperado de nódulos na tireóide / ano)	Risco Individual (a) (n° esperado de nódulos na tireóide/pessoa.ano)
SST1	$1,44 \times 10^{-2}$	$1,03 \times 10^{-9}$
SST2	$3,08 \times 10^{-3}$	$2,20 \times 10^{-10}$
SST3	$2,36 \times 10^{-4}$	$1,69 \times 10^{-11}$
SST4	$5,75 \times 10^{-7}$	$4,11 \times 10^{-14}$
SST5	$5,61 \times 10^{-8}$	$4,01 \times 10^{-15}$

(a) Foi considerada uma população de 14 milhões de habitantes.

É importante observar que, a exemplo das mortes devidas a câncer latente, o RRS /5/ considera que a ocorrência de nódulos na tireóide é esperada de 10 a 40 anos após a ocorrência do acidente.

Da Tabela 3.13 observou-se que a maior variação entre os riscos sociais e entre os riscos individuais de nódulos na tireóide foi da ordem de aproximadamente $2,6 \times 10^5$.

De maneira geral, com relação aos resultados obtidos, observou-se que os termos-fonte SST1 e SST2 produziram os riscos mais significativos ao público. Isto vem de encontro a conclusão obtida por Levenson & Rahn /26/, de que somente os acidentes envolvendo um significativo derretimento do núcleo do reator, com falhas da contenção, resultarão em risco significativo ao público, apesar da sua baixa probabilidade de ocorrência.

No documento emitido pela USNRC /17/, também observa-se que os acidentes

mais severos que o ABP utilizado pela USNRC em processos de seleção de sítio (ver seção 2.2), são dominantes quanto ao risco ao público. Esta observação confirmou-se na presente análise, uma vez que acidentes como o SST1 e o SST2, que são mais severos que o SST5 (equivalente ao ABP utilizado em processos de seleção de sítio pela USNRC), resultaram em riscos (sociais e individuais) superiores aos observados para SST5.

- Influência Devida a Reduções no Termo-Fonte

Conforme foi mencionado no item 2.3.3, os termos-fonte para acidentes severos podem apresentar magnitudes menores que as normalmente consideradas. Esta redução pode ocorrer quando da consideração de processos que resultem na diminuição da quantidade de material liberado após um acidente. Estes processos incluem o *plate-out* de vapores aquecidos, aglomeração e deposição de aerossóis e a dissolução de materiais solúveis em água.

De maneira a avaliar a influência exercida por potenciais reduções nos termos-fonte, devidas aos processos mencionados acima, foram postuladas várias liberações as quais corresponderiam à 50%, 10%, 5% e 1% da liberação correspondente ao termo-fonte SST1. Estas frações foram adotadas de maneira arbitrária e aplicadas para todos os grupos de radionuclídeos, exceto para os gases nobres.

Na Tabela 3.14 são apresentados os valores médios do número de mortes imediatas, do número de mortes devidas a câncer latente e das doses imediatas na medula óssea, resultantes das reduções no termo-fonte SST1.

Para estas situações não se observou a ocorrência de mortes imediatas, uma vez que o decréscimo das doses imediatas na medula óssea resultaram em valores que não ultrapassaram o valor de limiar de dose para a ocorrência de mortes imediatas.

Tabela 3.14 Valores médios para o número de mortes imediatas, o número de mortes devidas a câncer latente e doses imediatas na medula óssea, condicionais ao termo-fonte SSTI reduzido. (Hipóteses : distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4).

Termo-Fonte	Mortes Imediatas	Mortes Devidas a Câncer Latente	Doses Imediatas na Medula Ossea (Sv)
SSTI	5.070 (100)	424 (100)	5,7 (100)
SSTI-50%	0 (0)	375 (90)	2,85 (50)
SSTI-10%	0 (0)	134 (32)	$5,7 \times 10^{-1}$ (10)
SSTI-5%	0 (0)	82 (19)	$2,85 \times 10^{-1}$ (5)
SSTI-1%	0 (0)	34,6 (8)	$5,7 \times 10^{-2}$ (1)

• Os valores entre parênteses representam os valores percentuais com relação aos valores de SSTI, para cada tipo de consequência.

Observou-se, também, que a maior redução em SSTI, que foi de 1%, resultou em que o valor médio do número de mortes devidas a câncer latente seria cerca de 12 vezes menor com relação as mortes resultantes de SSTI. Com relação à dose imediata na medula óssea, a redução ocorreu segundo um fator de 100.

De maneira geral, observou-se que as reduções no termo-fonte SSTI afetaram de maneira mais significativa os efeitos imediatos na saúde em comparação com os efeitos latentes, visto que a redução obtida no valor médio do número de mortes imediatas foi bem mais acentuada quando comparada às reduções obtidas no valor médio do número de mortes devidas a câncer latente.

Considerando-se que a frequência anual de ocorrência do termo-fonte SSTI é 10^{-5} /37/, foram calculados os riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, que são apresentados na Tabela 3.15.

A exemplo da análise anterior, observou-se que a maior redução em SSTI, que foi de 1%, resultou em que os riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente seriam cerca de 12 vezes menores com relação aos riscos resultantes

de SST1, valendo, desse modo, as conclusões obtidas anteriormente.

Tabela 3.15 Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes de reduções no termo-fonte SST1. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4)

Termo-Fonte	Risco Social (n° esperado de mortes devidas a câncer laten- te / ano)	Risco Individual (a) (n° esperado de mortes devidas a câncer laten- te / pessoa.ano)
SST1	$4,24 \times 10^{-3}$	$3,03 \times 10^{-10}$
SST1-50%	$3,75 \times 10^{-3}$	$2,68 \times 10^{-10}$
SST1-10%	$1,34 \times 10^{-3}$	$9,57 \times 10^{-11}$
SST1-5%	$8,20 \times 10^{-4}$	$5,86 \times 10^{-11}$
SST1-1%	$3,46 \times 10^{-4}$	$2,47 \times 10^{-11}$

(a) Considerou-se uma população de 14 milhões de habitantes.

3.6.2 Influência das Condições Meteorológicas

Na análise da influência exercida por diferentes condições meteorológicas, procurou-se abranger uma gama de situações que representassem da maneira mais realística possível as condições meteorológicas para o sítio do IPEN e vizinhanças.

As condições meteorológicas consideradas (MET1 a MET12), consistiram de situações que envolveram a ocorrência ou não de precipitação, com diferentes intensidades, assim como de diferentes categorias de estabilidade atmosférica.

Considerou-se a ocorrência do termo-fonte SST1, o qual produziria as maiores liberações de radioatividade para o meio ambiente. Considerou-se também a distribuição populacional POP1 (ver Tabela 3.6), com o sítio do IPEN localizado no centro de uma área com 75 km de raio.

- Mortes Imediatas

Na Tabela 3.16 são apresentados os valores médios e máximos do número de mortes imediatas, resultantes das condições meteorológicas MET1 a MET12. Na Figura 3.6 são apresentadas as curvas CCDF para o número de mortes imediatas. Observou-se que as mortes devidas a exposição imediata somente foram observadas nos casos que consideraram a ocorrência de precipitação, com categorias de estabilidade atmosférica B e D. Nestes casos, as doses imediatas resultantes estavam acima do valor de limiar de dose para a ocorrência deste tipo de consequência, como pode ser observado na Figura 3.7, onde são apresentados os valores médios das doses imediatas na medula óssea, em função da distância, para as diferentes condições meteorológicas consideradas. A ocorrência de mortes imediatas ficou restrita à distância máxima de 1,5 km da instalação.

Convém observar que as doses imediatas resultantes da exposição externa devida aos radionuclídeos depositados sobre o solo (*groundshine*), foram as que mais contribuíram para a ocorrência das mortes imediatas, conforme pode ser observado na Tabela 3.17. Isto se explica, uma vez que a ocorrência de precipitação acentua a deposição de radionuclídeos sobre o solo. Essa deposição resulta num aumento das doses devidas ao *groundshine*, principalmente nos intervalos espaciais mais próximos ao reator, aumentando assim a possibilidade de ocorrência de mortes imediatas.

Apesar disso, para os casos MET5, MET8 e MET11, mesmo com a ocorrência de precipitação, não foram observadas mortes imediatas. Isto ocorreu devido a que os casos citados consideram a categoria de estabilidade F, a qual apresenta um mecanismo de mistura turbulenta menos acentuado que para as categorias de estabilidade B e D, resultando assim numa menor deposição de radionuclídeos. Em suma, as doses imediatas resultantes dos casos MET5, MET8 e MET11 não possuíam intensidade suficiente para causar mortes imediatas, apesar da ocorrência de precipitação.

Tabela 3.16 Valores médios e máximos para o número de mortes imediatas, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e distribuição populacional POP1 (zona urbana)).

Experi- mento	Mortes Imediatas	
	Média	Máximo
MET1	0	0
MET2	0	0
MET3	0	0
MET4	5.070	5.560
MET5	0	0
MET6	292	314
MET7	5.070	5.560
MET8	0	0
MET9	292	314
MET10	5.070	5.560
MET11	0	0
MET12	292	314

- Mortes Devidas a Câncer Latente

Na Tabela 3.18 são apresentados os valores médios e máximos do número de mortes devidas a câncer latente. Na Figura 3.8 são apresentadas as curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes das condições meteorológicas MET1 a MET12.

Observou-se que a maior variação experimentada pelos valores médios do número de mortes devidas a câncer latente foi da ordem de aproximadamente 4, enquanto que para os valores máximos foi da ordem de aproximadamente 5. Ficou evidente que a influência exercida pelas diferentes condições meteorológicas afetou de maneira pouco significativa as mortes devidas a câncer latente, quando

comparada com a influência exercida pelos diferentes termos-fonte considerados na análise realizada no ítem 4.6.1.

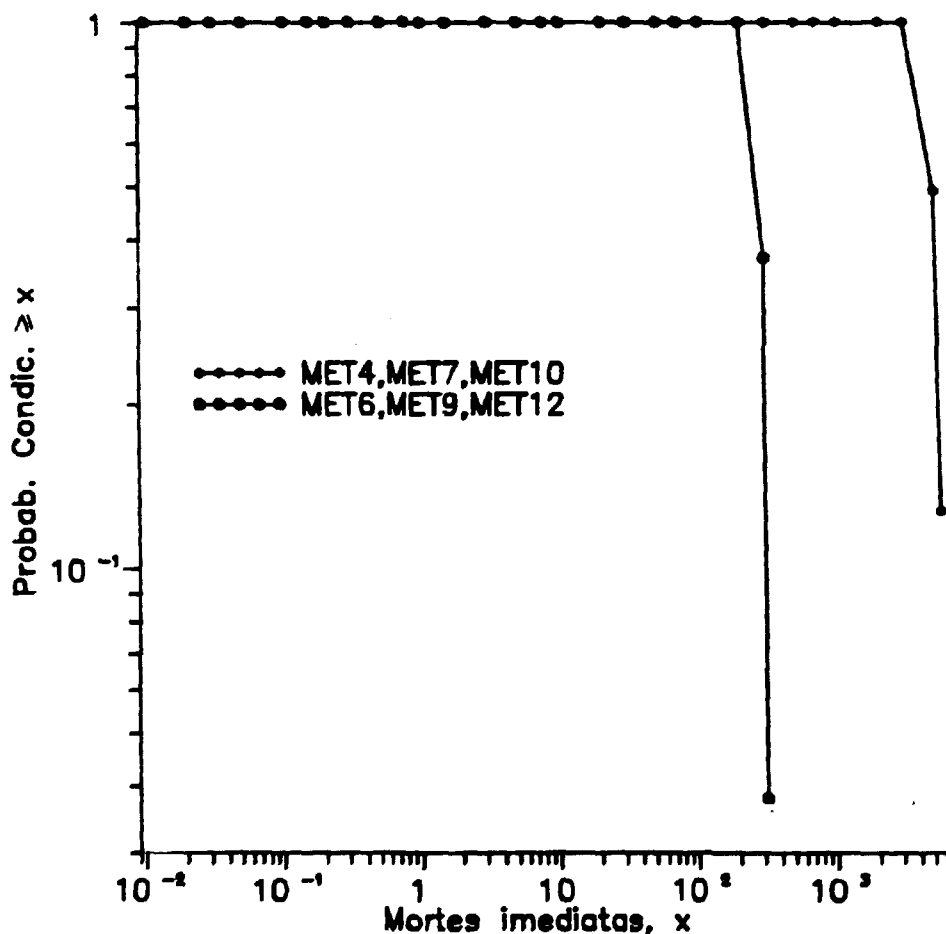


Figura 3.6 Curvas CCDF para o número de mortes imediatas, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e distribuição populacional POP1 (zona urbana))

Nos casos onde considerou-se a ocorrência de precipitação (MET4 a MET12), observou-se que, diferente do que foi observado com relação às mortes imediatas, a ocorrência de mortes devidas a câncer latente foi maior para os casos com categoria de estabilidade atmosférica F. Isto ocorreu uma vez que a categoria F, a qual representa as condições meteorológicas mais estáveis dentre as consideradas, resultou numa maior concentração de radionuclídeos na pluma.

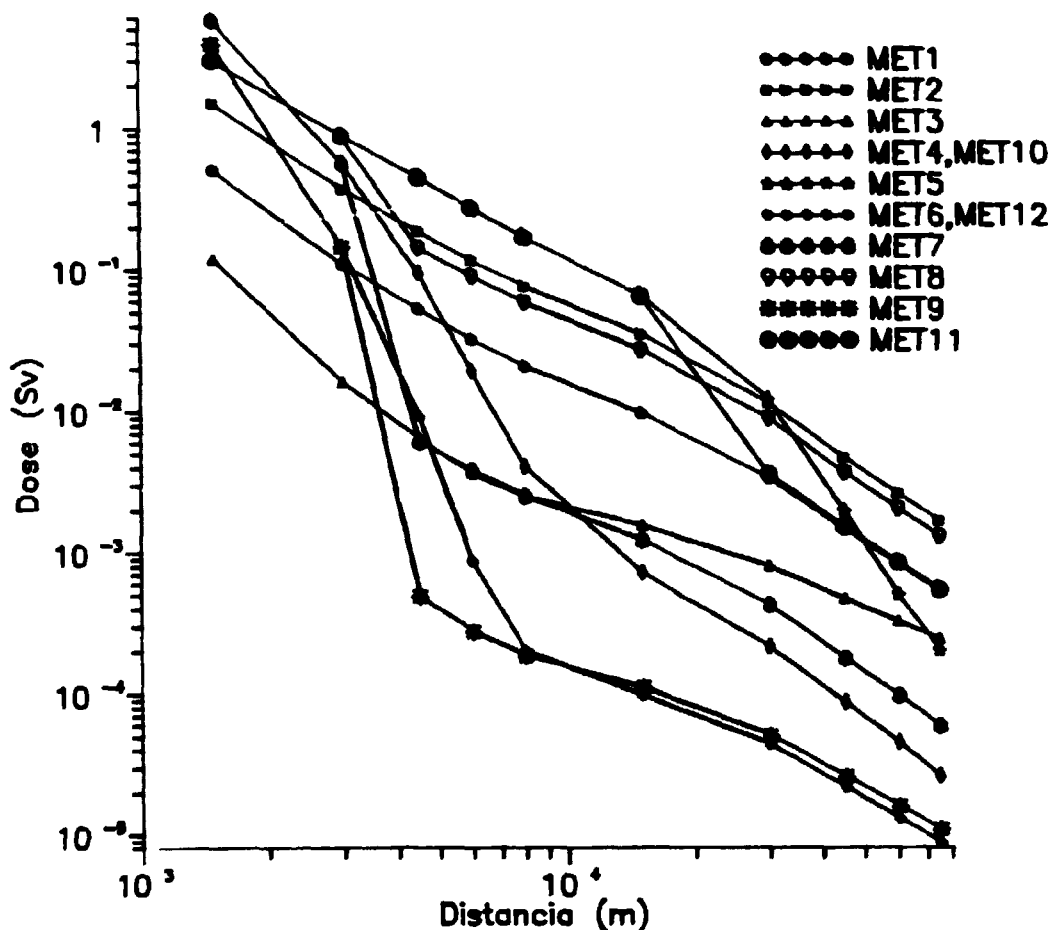


Figura 3.7 Valores médios das doses imediatas na medula óssea resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e distribuição populacional POP1 (zona urbana))

- Nódulos na Tireóide

Na Tabela 3.19 são apresentados os valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide. Na Figura 3.9 são apresentadas as curvas CCDF para esta variável, resultantes das condições meteorológicas MET1 a MET12.

Observou-se que a maior variação entre os valores médios ocorreu segundo um fator de aproximadamente 20, enquanto que para os valores máximos essa variação ocorreu segundo um fator de aproximadamente 22. Observou-se também que a

Tabela 3.17 Valores médios das doses imediatas na medula óssea, no intervalo espacial 1 (raio = 1,5 km), para os casos onde observou-se a ocorrência de mortes imediatas, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e distribuição populacional POP1 (zona urbana))

Experimento	Doses Imediatas na Medula Óssea (Sv)			
	Dose Total	Cloudshine	Groundshine	Inalação
MET4, MET7 e MET10	5,698	$6,293 \times 10^{-2}$	5,540	$9,539 \times 10^{-2}$
MET6, MET9 e MET12	3,891	$2,657 \times 10^{-2}$	3,845	$1,940 \times 10^{-2}$

Tabela 3.18 Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e distribuição populacional POP1 (zona urbana)).

Experimento	Mortes Devidas a Câncer Latente	
	Média	Máximo
MET1	1.570	1.940
MET2	1.500	2.110
MET3	633	752
MET4	424	543
MET5	1.540	1.930
MET6	677	739
MET7	374	440
MET8	1.510	2.000
MET9	617	678
MET10	424	543
MET11	1.490	1.720
MET12	677	739

ocorrência deste tipo de efeito foi maior para os casos com categoria de estabilidade atmosférica F.

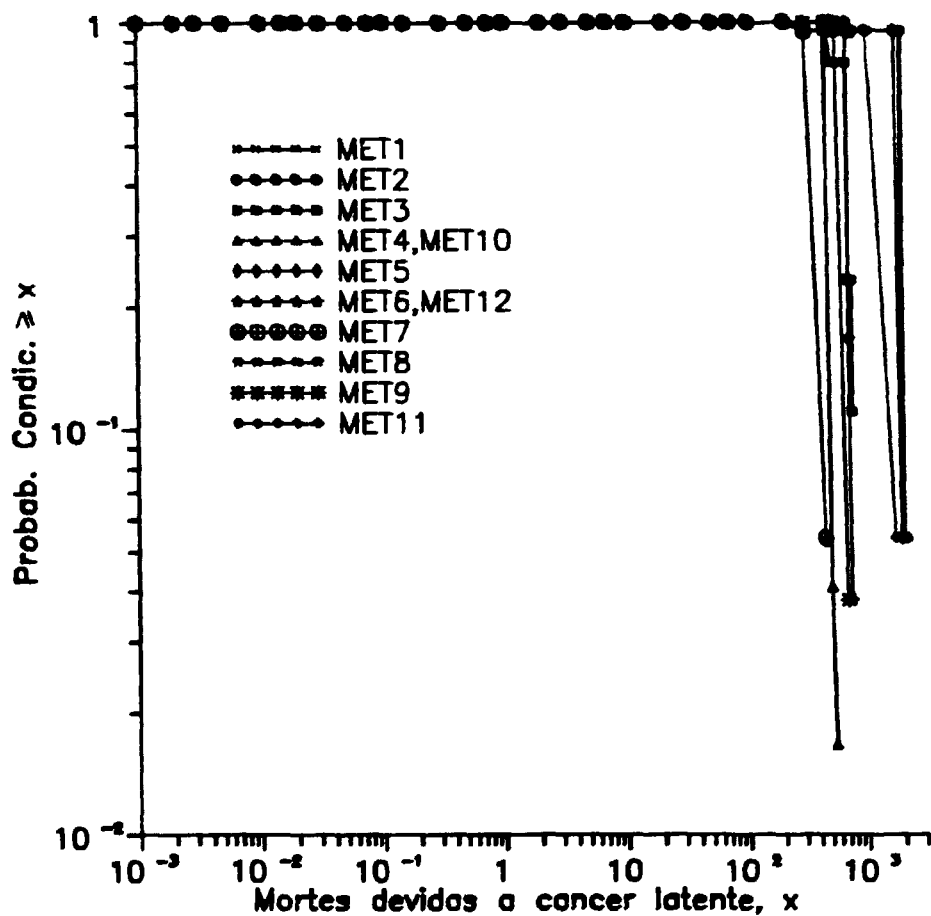


Figura 3.8 Curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e distribuição populacional POP1 (zona urbana))

É importante observar que a ocorrência de precipitação exerceu grande influência nas conseqüências resultantes, principalmente com relação às mortes imediatas, que foram observadas em distâncias próximas ao reator (até 1,5km), onde foram produzidas as maiores doses imediatas.

Tabela 3.19 Valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: termo-fonte SS11 e distribuição populacional POP1 (zona urbana))

Experi- mento	Nódulos na Tireóide	
	Média	Máximo
MET1	$1,38 \times 10^4$	$1,67 \times 10^4$
MET2	$2,83 \times 10^4$	$3,65 \times 10^4$
MET3	4.260	4.830
MET4	1.440	1.670
MET5	$1,69 \times 10^4$	$2,03 \times 10^4$
MET6	2.580	2.810
MET7	1.830	2.200
MET8	$2,23 \times 10^4$	$2,86 \times 10^4$
MET9	2.540	2.760
MET10	1.440	1.670
MET11	$1,70 \times 10^4$	$2,04 \times 10^4$
MET12	2.580	2.810

- Risco ao Público

Na Tabela 3.20 são apresentados os riscos sociais e individuais de mortes imediatas resultantes dos experimentos MET1 a MET12, utilizando-se a frequência anual de ocorrência do termo-fonte SST1, que é 10^{-5} /37/.

Observou-se que o risco social de mortes imediatas variou de 0 a $5,07 \times 10^{-2}$ mortes/ano, enquanto que o risco individual variou de 0 a $7,95 \times 10^{-7}$ mortes/pessoa.ano e, a exemplo da análise anterior, ocorreram apenas para os experimentos que consideraram a ocorrência de precipitação, com categorias de estabilidade atmosférica B e D.

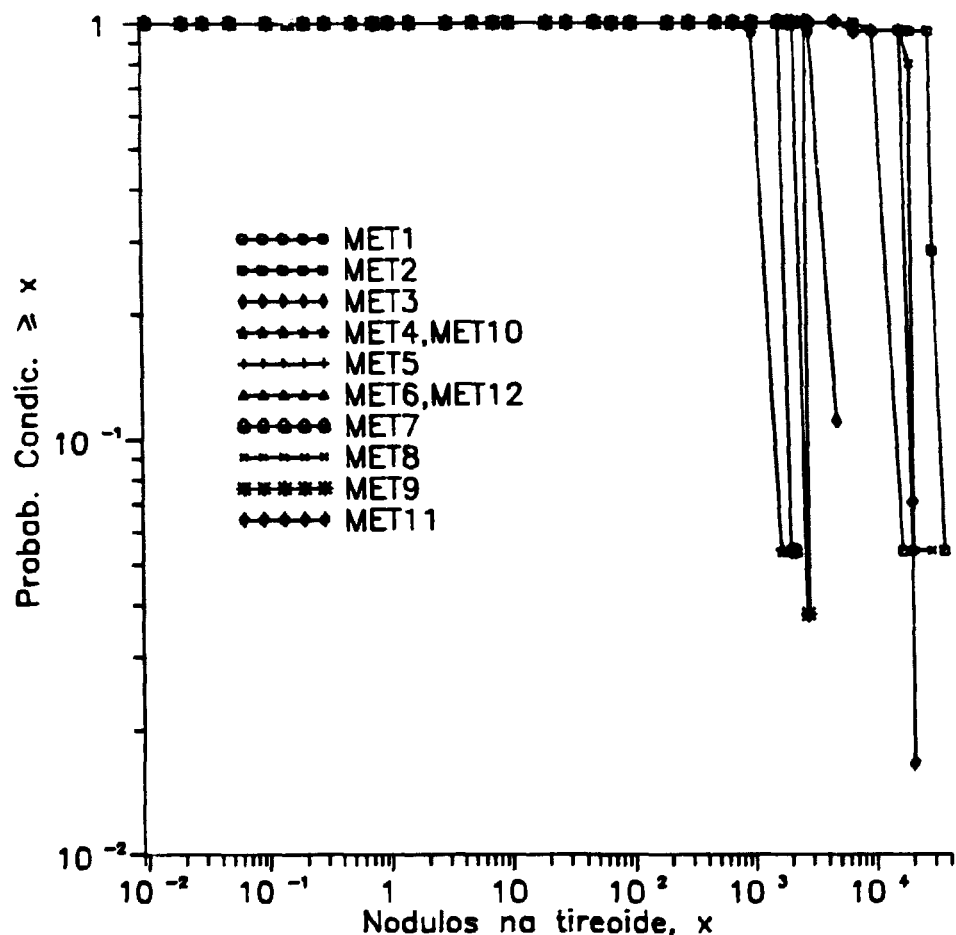


Figura 3.9 Curvas CCDF para o número de nódulos na tireóide, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e distribuição populacional POP1 (zona urbana))

Na Tabela 3.21 são apresentados os riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos experimentos MET1 a MET12.

Observou-se que a maior variação experimentada, tanto pelos riscos sociais quanto pelos riscos individuais, foi da ordem de aproximadamente 4. Ficou evidente que a influência exercida pelas diferentes condições meteorológicas afetou de maneira pouco significativa os riscos de mortes devidas a câncer latente, quando comparada à influência exercida pelos diferentes termos-fonte considerados na análise realizada no ítem 4.6.1.

Tabela 3.20 Riscos sociais e individuais de mortes imediatas resultantes dos experimentos MET1 a MET12. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e distribuição populacional POP1 (zona urbana))

Experimento	Risco Social (n.º esperado de mortes imediatas / ano)	Risco Individual (a) (n.º esperado de mortes imediatas/pessoa.ano)
MET1	0	0
MET2	0	0
MET3	0	0
MET4	$5,07 \times 10^{-2}$	$7,95 \times 10^{-7}$
MET5	0	0
MET6	$2,92 \times 10^{-3}$	$4,58 \times 10^{-8}$
MET7	$5,07 \times 10^{-2}$	$7,95 \times 10^{-7}$
MET8	0	0
MET9	$2,92 \times 10^{-3}$	$4,58 \times 10^{-8}$
MET10	$5,07 \times 10^{-2}$	$7,95 \times 10^{-7}$
MET11	0	0
MET12	$2,92 \times 10^{-3}$	$4,58 \times 10^{-8}$

(a) Foi considerada a população existente no intervalo espacial I, que totaliza 63.803 habitantes.

Tabela 3.21 Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos experimentos MET1 a MET12. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e distribuição populacional POP1 (zona urbana))

Experimento	Risco Social (n.º esperado de mortes devidas a câncer latente / ano)	Risco Individual (a) (n.º esperado de mortes devidas a câncer latente / pessoa.ano)
MET1	$1,57 \times 10^{-2}$	$1,12 \times 10^{-9}$
MET2	$1,50 \times 10^{-2}$	$1,07 \times 10^{-9}$
MET3	$6,33 \times 10^{-3}$	$4,52 \times 10^{-10}$
MET4	$4,24 \times 10^{-3}$	$3,03 \times 10^{-10}$
MET5	$1,54 \times 10^{-2}$	$1,10 \times 10^{-9}$
MET6	$6,77 \times 10^{-3}$	$4,84 \times 10^{-10}$
MET7	$3,74 \times 10^{-3}$	$2,67 \times 10^{-10}$
MET8	$1,51 \times 10^{-2}$	$1,08 \times 10^{-9}$
MET9	$6,17 \times 10^{-3}$	$4,41 \times 10^{-10}$
MET10	$4,24 \times 10^{-3}$	$3,03 \times 10^{-10}$
MET11	$1,49 \times 10^{-2}$	$1,06 \times 10^{-9}$
MET12	$6,77 \times 10^{-3}$	$4,84 \times 10^{-10}$

(a) Considerou-se uma população de 14 milhões de habitantes.

Na Tabela 3.22 são apresentados os riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide, resultante dos experimentos MET1 a MET12.

Tabela 3.22 Riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide, resultantes dos experimentos MET1 a MET12. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e distribuição populacional POP1 (zona Urbana))

Experimento	Risco Social	Risco Individual (a)
	(n° esperado de nódulos na tireóide / ano)	(n° esperado de nódulos na tireóide/pessoa.ano)
MET1	$1,38 \times 10^{-1}$	$9,86 \times 10^{-9}$
MET2	$2,83 \times 10^{-1}$	$2,02 \times 10^{-8}$
MET3	$4,26 \times 10^{-2}$	$3,04 \times 10^{-9}$
MET4	$1,44 \times 10^{-2}$	$1,03 \times 10^{-9}$
MET5	$1,69 \times 10^{-1}$	$1,21 \times 10^{-8}$
MET6	$2,58 \times 10^{-2}$	$1,84 \times 10^{-9}$
MET7	$1,83 \times 10^{-2}$	$1,31 \times 10^{-9}$
MET8	$2,23 \times 10^{-1}$	$1,59 \times 10^{-8}$
MET9	$2,54 \times 10^{-2}$	$1,81 \times 10^{-9}$
MET10	$1,44 \times 10^{-2}$	$1,03 \times 10^{-9}$
MET11	$1,70 \times 10^{-1}$	$1,21 \times 10^{-8}$
MET12	$2,58 \times 10^{-2}$	$1,84 \times 10^{-9}$

(a) Considerou-se uma população de 14 milhões de habitantes.

Observou-se que a maior variação experimentada tanto pelos riscos sociais quanto pelos riscos individuais foi da ordem de aproximadamente 20.

3.6.3 Influência da Distribuição Populacional

Na análise da influência exercida pelas diferentes distribuições populacionais (POP1 a POP9), considerou-se a ocorrência do termo-fonte SST1 e a condição meteorológica MET4, com o reator localizado no sítio do IPEN.

Todas as distribuições populacionais consideradas possuem a população total em torno de 14 milhões de habitantes, dentro da região correspondente à área com raio de 75 km.

- Mortes Imediatas

Na Tabela 3.23, são apresentados os valores médios e máximos do número de mortes imediatas, assim como a probabilidade de ocorrência de no mínimo uma morte imediata e a probabilidade de ocorrência do valor máximo, condicionais à ocorrência do termo-fonte SST1, resultantes das distribuições POP1, POP2 e POP3, que foram as únicas que produziram este tipo de consequência. Na Figura 3.10, são apresentadas as curvas CCDF para o número de mortes imediatas, resultantes das mesmas distribuições.

As doses devidas a exposição imediata ocorreram em intensidade suficiente para resultarem em mortes somente para distâncias até 1,5 km, a qual equivale ao raio externo do intervalo espacial I. Para distâncias maiores, elas sempre atingiram valores inferiores aos do limiar de dose para a ocorrência deste tipo de consequência. Isto explica porque somente as distribuições que apresentaram população no intervalo espacial I produziram mortes imediatas.

Tabela 3.23 Valores médios e máximos para o número de mortes imediatas resultantes das distribuições populacionais POP1, POP2 e POP3, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e condições meteorológicas MET4).

Distribuição	Média	$P(\geq 1)$ [*]	Máximo	P_{max}
POP1	5.070	1,0	5.560	$1,27 \times 10^{-1}$
POP2	447	1,0	447	1,0
POP3	433	$2,06 \times 10^{-1}$	4.410	$4,96 \times 10^{-2}$

^{*} $P(\geq 1)$ = probabilidade de ocorrência de no mínimo uma morte imediata.

Utilizando-se a Tabela 3.23 e a Figura 3.10, comparou-se a distribuição POP2, na qual a população foi distribuída homogeneamente (aproximadamente 795 habitantes por km²), com POP3, onde toda a população

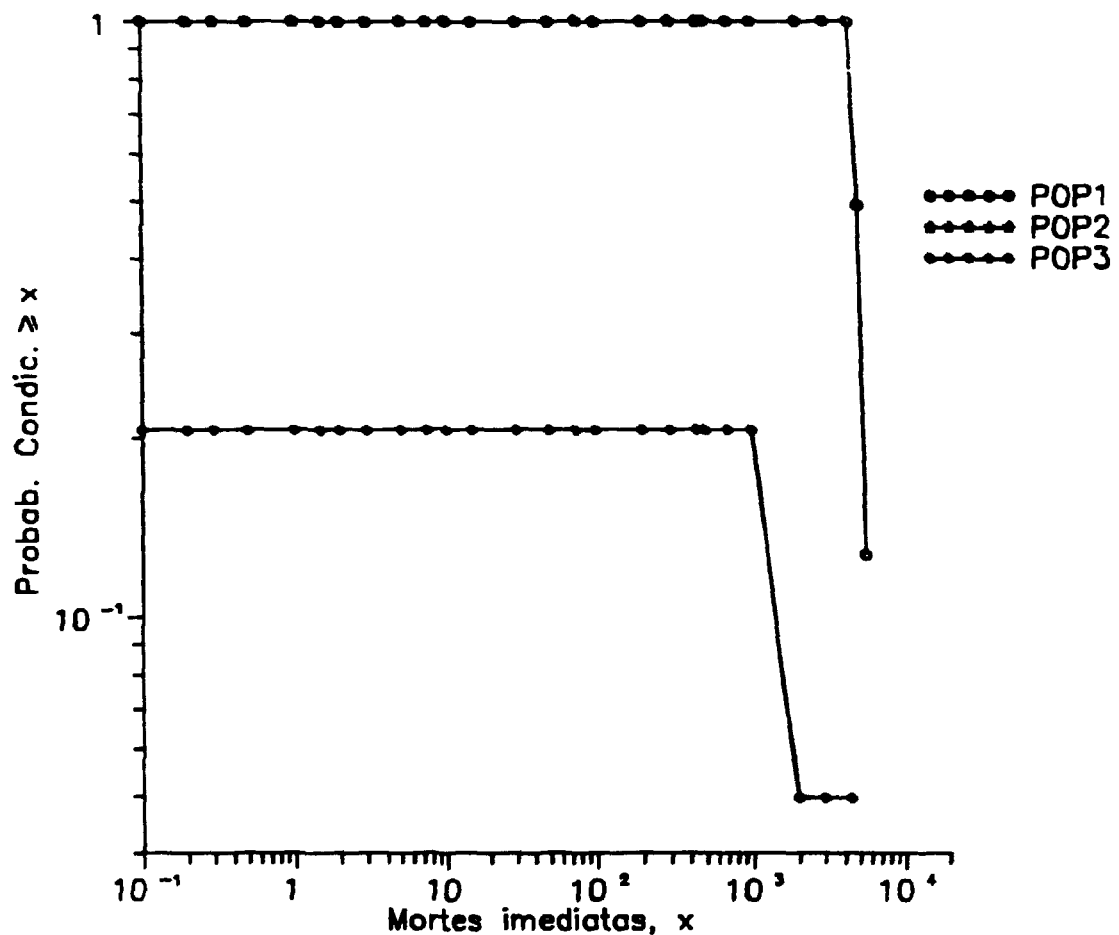


Figura 3.10 Curvas CCDF para o número de mortes imediatas resultantes das distribuições populacionais POP1, POP2 e POP3, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e condições meteorológicas MET4)

encontra-se distribuída num único setor com $22,5^0$. Observou-se que o valor máximo para o número de mortes imediatas resultantes de POP3 foi aproximadamente 10 vezes maior que para POP2, uma vez que em POP3, devido a população encontrar-se num único setor, a densidade de população é maior do que em POP2 (exatamente por um fator de 16). Com relação à probabilidade de ocorrência de no mínimo uma morte imediata, observou-se que para POP3 ela é menor que para POP2, da ordem de 5 vezes aproximadamente. Isto pode ser explicado, uma vez que, em POP3, 15 setores encontravam-se vazios, reduzindo assim a probabilidade de ocorrência de mortes imediatas, e, como na previsão destes efeitos considerou-se todos os 16 setores (os resultados levaram em conta a frequência de direção do vento), a probabilidade

de que a pluma atravessasse setores em que não há população aumenta, portanto a probabilidade de que a pluma passe apenas por um setor decresce.

Da comparação de POP2 com POP1, a qual apresenta a distribuição "real" de população, observou-se que os valores médios e máximos para o número de mortes imediatas resultantes de POP1 são cerca de 11 e 12 vezes maiores que para POP2, respectivamente. Isto ocorreu devido a distribuição POP1 apresentar setores com grandes centros de população, onde a densidade populacional é maior que aquela da distribuição POP2 (densidade populacional uniforme).

Analisando-se os casos onde ocorreram mortes imediatas, observou-se que a maior variação entre os valores médios deu-se segundo um fator de aproximadamente 12, o mesmo acontecendo com relação aos valores máximos. A variação experimentada pela probabilidade de ocorrência de no mínimo uma morte imediata foi da ordem de aproximadamente 5, configurando assim a influência exercida pelas diferentes distribuições populacionais na ocorrência de mortes imediatas.

- Mortes Devidas a Câncer Latente

Na Tabela 3.24, são apresentados os valores médios e máximos do número de mortes devidas a câncer latente, assim como a probabilidade de ocorrência de no mínimo de uma morte e a probabilidade de ocorrência do valor máximo, resultantes das distribuições POP1 a POP9. Na Figura 3.11 são apresentadas as curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes das mesmas distribuições populacionais.

Da comparação de POP2 com POP1, observou-se que, a exemplo do que ocorreu com relação às mortes imediatas, o valor máximo do número de mortes devidas a câncer latente foi maior para POP1, segundo um fator de aproximadamente 13.

A distribuição POP2, como já visto, apresenta a população distribuída homogeneamente, enquanto que as distribuições POP3 a POP9, apesar de serem distintas, possuem em comum a característica de apresentarem vários espaços

Tabela 3.24 Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e condições meteorológicas MET4).

Distribuição	Média	P(≥ 1) [*]	Máximo	P _{max.}
POP1	424	1,0	543	$1,66 \times 10^{-2}$
POP2	40,5	1,0	40,5	1,0
POP3	37,3	$2,06 \times 10^{-1}$	467	$4,96 \times 10^{-2}$
POP4	16,9	1,0	88,5	$4,96 \times 10^{-2}$
POP5	7,38	1,0	59,6	$4,96 \times 10^{-2}$
POP6	5,84	$2,06 \times 10^{-1}$	72,7	$4,96 \times 10^{-2}$
POP7	1,81	$2,06 \times 10^{-1}$	22,8	$4,96 \times 10^{-2}$
POP8	$1,56 \times 10^{-1}$	0	$3,19 \times 10^{-1}$	$4,96 \times 10^{-2}$
POP9	$1,25 \times 10^{-1}$	0	$5,53 \times 10^{-1}$	$4,96 \times 10^{-2}$

^{*} P(≥ 1) = probabilidade de ocorrência de no mínimo uma morte devida a câncer latente.

(setores e/ou intervalos espaciais) vazios, isto é, sem nenhuma população. Na comparação, ficou evidenciado que as probabilidades de ocorrência de no mínimo uma morte, para as referidas distribuições, são menores em relação a POP2, com exceção de POP4 e POP5. Ficou evidente, portanto, que a existência de espaços vazios nas distribuições consideradas contribuíram, na maioria dos casos, de maneira significativa para o decréscimo da probabilidade de ocorrência deste tipo de consequência. Por outro lado, o valor máximo do número de mortes devidas a câncer latente resultante de cada distribuição, com exceção de POP7, POP8 e POP9, foi maior em relação a POP2.

Comparando-se todas as distribuições populacionais, observou-se que a maior variação entre os valores médios ocorreu segundo um fator de aproximadamente $3,3 \times 10^3$, enquanto que para os valores máximos este fator foi de aproximadamente $1,7 \times 10^3$. Com relação às probabilidades de ocorrência de no mínimo uma morte, observou-se que as mesmas variaram de 0 a 1. Portanto, ficou evidenciado que as

diferentes distribuições populacionais influenciaram significativamente a ocorrência de mortes devidas a câncer latente.

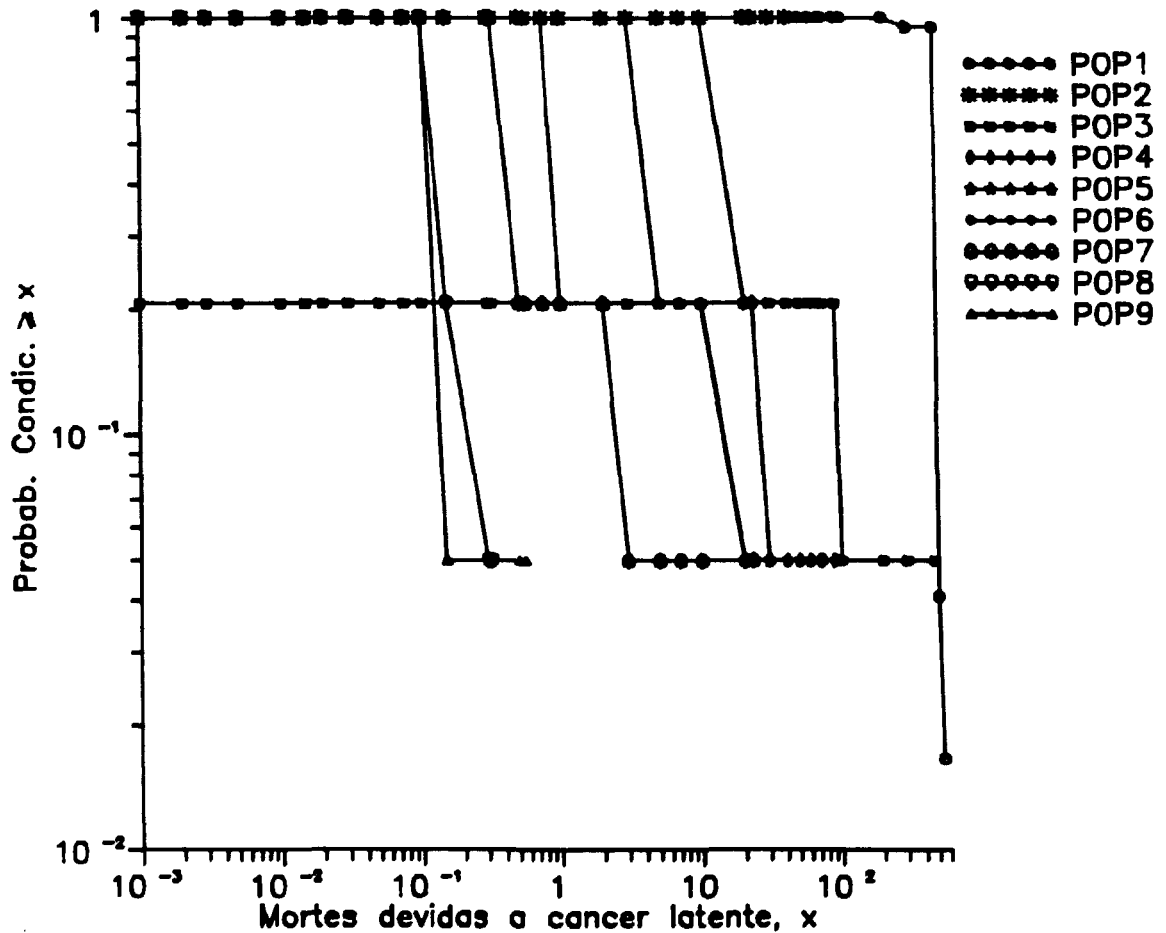


Figura 3.11 Curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e condições meteorológicas MET4)

- Nódulos na Tireóide

Na Tabela 3.25 são apresentados os valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, assim como as probabilidades de ocorrência de no mínimo um nódulo e de ocorrência do valor máximo. Na Figura 3.12 são mostradas as curvas CCDF para esta variável, resultantes das distribuições POP1 a POP9. Observou-se que a maior variação entre os valores médios de nódulos

na tireóide ocorreu segundo um fator de aproximadamente $2,3 \times 10^3$, enquanto que para os valores máximos este fator foi de aproximadamente 10^3 . Com relação às probabilidades de ocorrência de no mínimo um nódulo na tireóide, a maior variação observada deu-se segundo um fator de aproximadamente 20. Observou-se também que as várias distribuições populacionais consideradas influenciaram de maneira semelhante tanto o número de mortes devidas a câncer latente quanto o número de nódulos na tireóide.

Tabela 3.25 Valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e condições meteorológicas MET4).

Distribuição	Média	$P(\geq 1)$ ^o	Máximo	P_{max} .
POP1	1.440	1,0	1.670	$5,37 \times 10^{-2}$
POP2	141	1,0	141	1,0
POP3	131	$2,06 \times 10^{-1}$	1.590	$4,96 \times 10^{-2}$
POP4	51,2	1,0	451	$4,96 \times 10^{-2}$
POP5	18,1	1,0	170	$4,96 \times 10^{-2}$
POP6	9,65	1,0	102	$4,96 \times 10^{-2}$
POP7	3,66	1,0	32,9	$4,96 \times 10^{-2}$
POP8	$7,84 \times 10^{-1}$	$4,96 \times 10^{-2}$	1,6	$4,96 \times 10^{-2}$
POP9	$6,28 \times 10^{-1}$	$4,96 \times 10^{-2}$	2,77	$4,96 \times 10^{-2}$

^o $P(\geq 1)$ = probabilidade de ocorrência de no mínimo um nódulo na tireóide.

- Efeito da Distância no Número de Mortes Devidas a Câncer Latente

Com o objetivo de analisar a influência da distância de centros populacionais no número de mortes devidas a câncer latente, foram postuladas distribuições distintas, onde um centro populacional com 20.000 habitantes localiza-se em diferentes distâncias, conforme é mostrado na Tabela 3.26, onde

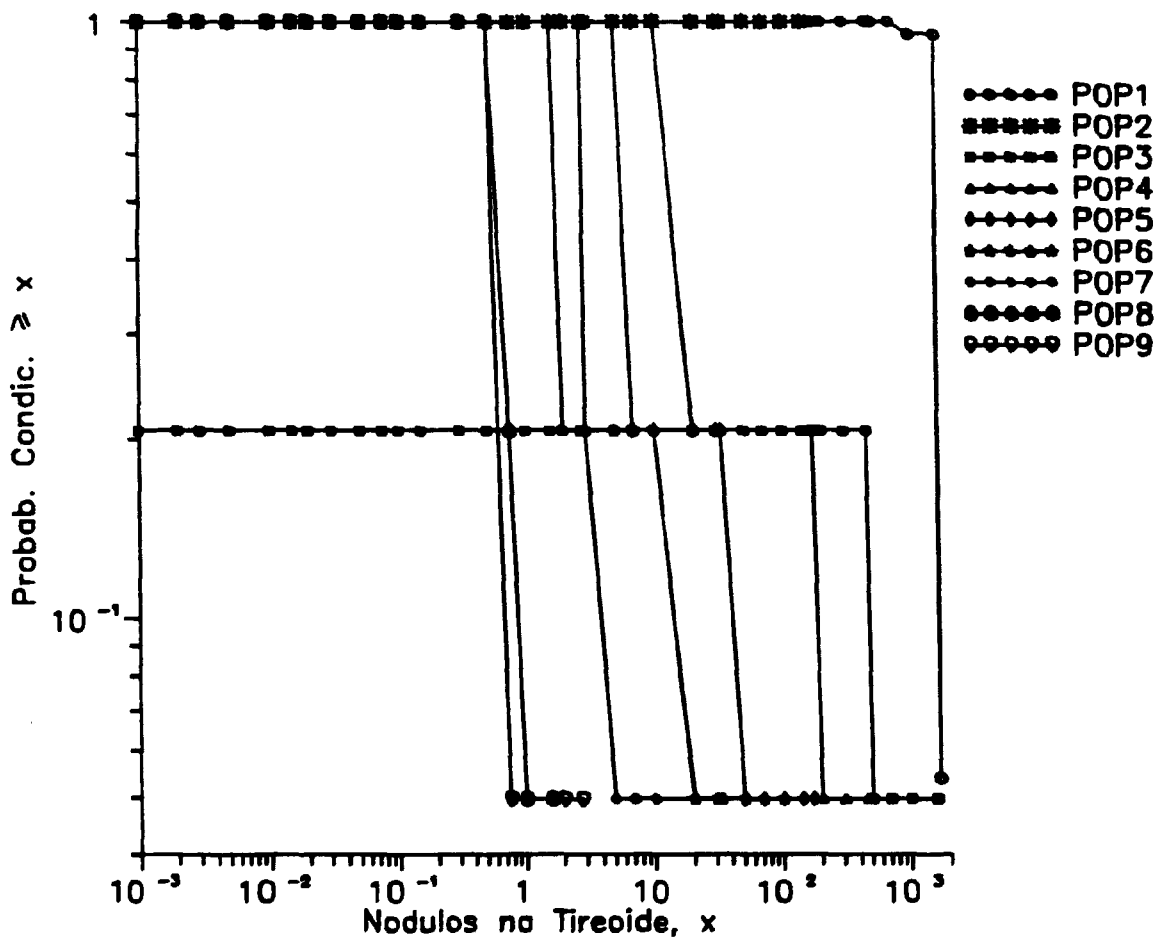


Figura 3.12 Curvas CCDF para o número de nódulos na tireóide, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e condições meteorológicas MET4)

são também apresentados os valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, assim como a probabilidade de ocorrência de no mínimo uma morte.

Da Tabela 3.26, observou-se que quanto mais afastado do reator estiver o centro populacional, menor será o número de mortes observadas. Comparando-se os resultados obtidos em D1 (centro mais próximo) com os obtidos em D6 (centro mais afastado), observou-se que a variação entre os valores médios ocorreu segundo um fator de aproximadamente 10^5 , enquanto que a variação entre as suas distâncias ocorreu segundo um fator de 40. Como para as várias distâncias o número de

habitantes dos centros populacionais manteve-se inalterado, pode-se afirmar que as variações obtidas no valor médio do número de mortes devidas a câncer latente devem-se, provavelmente, à variação das doses (imediatas e crônicas) com a distância.

Tabela 3.26 Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, para um centro populacional localizado em diferentes distâncias a partir do reator, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e condições meteorológicas MET4).

Distribuição	Distância (km)	Média	Máximo	P(≥ 1) [*]
D1	1,5	12,5	156	$4,96 \times 10^{-2}$
D2	3,0	4,14	56,4	$4,96 \times 10^{-2}$
D3	4,5	3,33	47,9	$4,96 \times 10^{-2}$
D4	6,0	$5,98 \times 10^{-1}$	9,0	$4,96 \times 10^{-2}$
D5	15,0	$1,27 \times 10^{-3}$	$2,30 \times 10^{-2}$	$4,96 \times 10^{-2}$
D6	60,0	$1,24 \times 10^{-4}$	$2,50 \times 10^{-3}$	$4,96 \times 10^{-2}$

* P(≥ 1) = probabilidade de ocorrência de no mínimo uma morte devida a câncer latente.

- Risco ao Público

Na Tabela 3.27 são apresentados os riscos sociais e individuais de mortes imediatas, resultantes das distribuições populacionais POP1, POP2 e POP3.

Observou-se que a maior variação experimentada tanto pelos riscos sociais quanto pelos riscos individuais, para os casos em que foi observada a ocorrência de mortes imediatas, foi da ordem de aproximadamente 12.

Na Tabela 3.28 são apresentados os riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9.

Tabela 3.27 Riscos sociais e individuais de mortes imediatas resultantes das distribuições populacionais POP1, POP2 e POP3. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e condições meteorológicas MET4)

(a) Distribuição	Risco Social (n.º esperado de mortes imediatas / ano)	Risco Individual (b) (n.º esperado de mortes imediatas/pessoa.ano)
POP1	$5,07 \times 10^{-2}$	$7,95 \times 10^{-7}$
POP2	$4,47 \times 10^{-3}$	$7,01 \times 10^{-8}$
POP3	$4,33 \times 10^{-3}$	$6,79 \times 10^{-8}$

- (a) O risco social e individual de mortes imediatas resultante das distribuições POP4 a POP9 é zero, uma vez que para estas distribuições não foi observada a ocorrência de mortes imediatas.
- (b) Considerou-se a população existente no intervalo espacial 1, que é de 63.803 habitantes.

Tabela 3.28 Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e condições meteorológicas MET4)

Distribuição	Risco Social (n.º esperado de mortes devidas a câncer latente / ano)	Risco Individual (a) (n.º esperado de mortes devidas a câncer latente / pessoa.ano)
POP1	$4,24 \times 10^{-3}$	$3,03 \times 10^{-10}$
POP2	$4,05 \times 10^{-4}$	$2,89 \times 10^{-11}$
POP3	$3,73 \times 10^{-4}$	$2,66 \times 10^{-11}$
POP4	$1,69 \times 10^{-4}$	$1,21 \times 10^{-11}$
POP5	$7,38 \times 10^{-5}$	$5,27 \times 10^{-12}$
POP6	$5,84 \times 10^{-5}$	$4,17 \times 10^{-12}$
POP7	$1,81 \times 10^{-5}$	$1,29 \times 10^{-12}$
POP8	$1,56 \times 10^{-6}$	$1,11 \times 10^{-13}$
POP9	$1,25 \times 10^{-6}$	$8,93 \times 10^{-14}$

- (a) Considerou-se uma população de 14 milhões de habitantes.

Observou-se que a maior variação experimentada, tanto pelos riscos sociais quanto pelos riscos individuais de mortes devidas a câncer latente, foi da ordem de aproximadamente $3,4 \times 10^3$.

Na Tabela 3.29 são apresentados os riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9.

Tabela 3.29 Riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9. (Hipóteses: termo-fonte SST1 e condições meteorológicas MET4)

Distribuição	Risco Social (nº esperado de nódulos na tireóide / ano)	Risco Individual (a) (nº esperado de nódulos na tireóide/pessoa.ano)
POP1	$1,44 \times 10^{-2}$	$1,03 \times 10^{-9}$
POP2	$1,41 \times 10^{-3}$	$1,01 \times 10^{-10}$
POP3	$1,31 \times 10^{-3}$	$9,36 \times 10^{-11}$
POP4	$5,12 \times 10^{-4}$	$3,66 \times 10^{-11}$
POP5	$1,81 \times 10^{-4}$	$1,29 \times 10^{-11}$
POP6	$9,65 \times 10^{-5}$	$6,89 \times 10^{-12}$
POP7	$3,66 \times 10^{-5}$	$2,61 \times 10^{-12}$
POP8	$7,84 \times 10^{-6}$	$5,60 \times 10^{-13}$
POP9	$6,28 \times 10^{-6}$	$4,49 \times 10^{-13}$

(a) Considerou-se uma população de 14 milhões de habitantes.

Observou-se que a maior variação experimentada, tanto pelos riscos sociais quanto pelos riscos individuais de nódulos na tireóide, foi de aproximadamente $2,3 \times 10^3$.

3.6.4 Comparação Entre Acidentes Ocorridos no Sítio do IPEN e Numa Área Rural

Realizou-se uma comparação entre as consequências resultantes de acidentes postulados para o reator de referência BR3, onde foram consideradas duas situações distintas:

- Reator localizado no sítio do IPEN, próximo a uma área com grande densidade populacional (ver Tabela 3.6);
- Reator localizado numa área com características demográficas representativas de uma região rural do estado de São Paulo (ver Tabela 3.7).

Para as duas situações foi considerado o cenário composto pelo acidente com o termo-fonte SST1 e com as condições meteorológicas correspondentes ao

experimento MET4, uma vez que nas análises anteriores observou-se que este cenário produziu as consequências mais severas. O termo-fonte SST1 refer-se ao acidente mais severo dentre os postulados na análise, resultando na maior liberação de radionuclídeos para o meio ambiente, enquanto que o experimento MET4 considerou a ocorrência de precipitação em toda a área analisada, visto que as maiores consequências foram observadas quando da ocorrência de precipitação no instante correspondente ao início do acidente e durante todo o transcorrer do mesmo.

- Mortes Imediatas

Na Tabela 3.30 são apresentados os valores médios e máximos do número de mortes imediatas, assim como a probabilidade de ocorrência de morte imediata ($P \neq 0$) e a probabilidade de ocorrência do valor máximo, para as duas situações. Os resultados são condicionais ao termo-fonte SST1 (probabilidade de ocorrência igual a 1).

Tabela 3.30 Valores médios e máximos para o número de mortes imediatas resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: distribuição populacional POP1, termo-fonte SST1 e condições meteorológicas MET4).

Localização do Sítio do Reator	Média	$P(\neq 0)$	Máximo	$P_{max.}$
Sítio do IPEN	5.070	1,0	5.560	$1,27 \times 10^{-1}$
Área Rural	11,5	1,0	11,5	1,0

Na Figura 3.13, são mostradas as curvas CCDF para o número de mortes imediatas, para as duas situações onde ocorrem os acidentes, condicionais à ocorrência do termo-fonte SST1.

Da Tabela 3.30 e da Figura 3.13, observou-se que para o acidente postulado no sítio do IPEN os valores médios e máximos do número de mortes

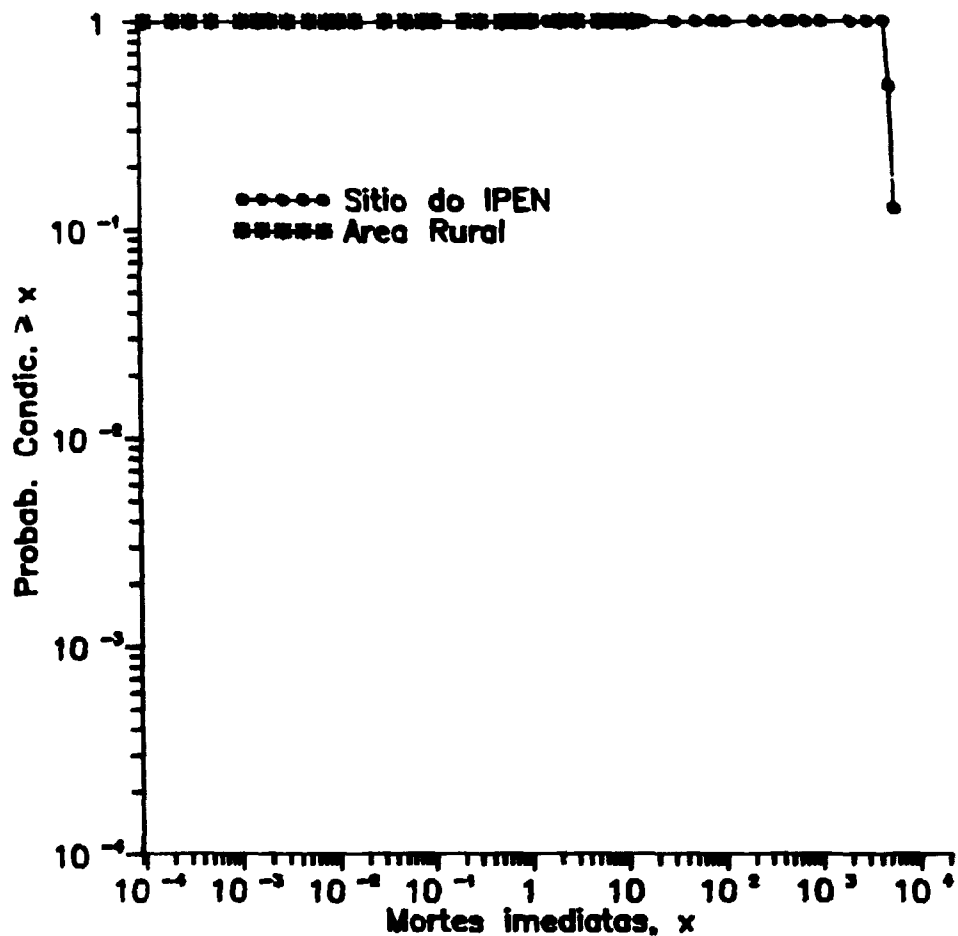


Figura 3.13 Curvas CCDF para o número de mortes imediatas, resultantes das duas situações de acidentes (sítio do IPEN e área rural), condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: termo-fonte SST1, condições meteorológicas MET4 e distribuição populacional POP1)

imediatas foram bem maiores que os resultantes do acidente postulado na região rural, da ordem de aproximadamente 441 e 483, respectivamente. Como visto anteriormente, a ocorrência de mortes devidas a exposição imediata é esperada somente a partir de grandes doses de radiação, de acordo com os valores estabelecidos de limiar de dose. Normalmente este tipo de consequência é esperado ocorrer em áreas próximas ao reator. Na análise feita, a maior distância na qual ocorreram mortes imediatas foi de 1,5 km, para as duas situações. Esta distância corresponde ao raio do intervalo espacial 1. Das Tabelas 3.6 e 3.7, ficou evidente que a população total do intervalo espacial 1 é maior para a distribuição populacional do sítio do IPEN, em comparação com a distribuição populacional do

sítio localizado na área rural, explicando-se, daí, porque o acidente na primeira situação resultou em maior número de mortes imediatas.

Com relação a este resultado, é importante notar que, restringindo o número de habitantes na área onde é esperada a ocorrência de mortes imediatas, pode-se reduzir significativamente o número destes efeitos.

Considerando-se a frequência anual de ocorrência do acidente com termo-fonte SST1, que é 10^{-5} /37/, e os valores médios do número de mortes imediatas, foram calculados os riscos sociais e individuais de mortes imediatas, resultantes das duas situações de acidentes, que são mostrados na Tabela 3.31.

Tabela 3.31 Riscos sociais e individuais de mortes imediatas resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural. (Hipóteses: distribuição populacional POP1, termo-fonte SST1 e condições meteorológicas MET4)

Localização do Sítio do Reator	Risco Social (n.º esperado de mortes imediatas / ano)	Risco Individual (n.º esperado de mortes imediatas/pessoa.ano)
Sítio IPEN	$5,07 \times 10^{-2}$	$7,95 \times 10^{-7}$ (a)
Área Rural	$1,15 \times 10^{-4}$	$7,99 \times 10^{-7}$ (b)

- (a) Considerou-se a população do intervalo espacial 1, para o reator localizado no sítio do IPEN, que é de 63.803 habitantes.
(b) Considerou-se a população do intervalo espacial 1, para o reator localizado na área rural, que é de 144 habitantes.

Observou-se que o risco social é cerca de 441 vezes maior para o reator localizado no sítio do IPEN com relação ao reator localizado na área rural. Contudo, o risco individual é praticamente o mesmo para as duas situações. Isto se explica, uma vez que a população considerada levou em conta apenas aquela existente no intervalo espacial 1, que para o sítio do IPEN é cerca de 443 vezes maior com relação àquela da área rural.

Conforme observado, o risco individual de mortes imediatas, para as duas situações analisadas, é da ordem de 8×10^{-7} mortes imediatas/pessoa.ano. Para uma

melhor compreensão do significado deste resultado, foi efetuada uma comparação com os riscos individuais de mortes imediatas resultantes de causas diversas, as quais não envolvem acidentes em reatores nucleares, que são mostrados na Tabela 3.32.

Tabela 3.32 Riscos individuais de mortes imediatas devidos a diversas causas.

(Fonte: RSS /² ,

Causa do Acidente	Risco Individual ^(a) (Mortes imediatas/ pessoa.ano)
Veículos a Motor	3×10^{-4}
Quedas	9×10^{-5}
Incêndios	4×10^{-6}
Afogamento	3×10^{-5}
Envenenamento	2×10^{-5}
Armas de Fogo	1×10^{-5}
Trabalho com Máquinas	1×10^{-5}
Transportes Aquáticos	9×10^{-6}
Viagens Aéreas	9×10^{-6}
Queda de Objetos	6×10^{-6}
Eletrocução	6×10^{-6}
Viagens por Ferrovias	4×10^{-6}
Raio	5×10^{-7}
Tornados	4×10^{-7}
Furacões	4×10^{-7}
Todos os Acidentes Não Nucleares	6×10^{-4}

(a) Estes valores são baseados na população total dos Estados Unidos (censo de 1970)

Observou-se que o risco individual de mortes imediatas resultantes das duas situações analisadas é significativamente menor que o risco individual de mortes imediatas resultantes de acidentes não nucleares ocorridos, por exemplo, nos Estados Unidos, segundo um fator de aproximadamente 10^{-3} . Verificou-se também que o risco individual de mortes imediatas resultante dos acidentes postulados para o reator BR3 possui a mesma ordem de grandeza que os riscos individuais de mortes imediatas resultantes de raios, tornados e furacões, segundo estatísticas norte-americanas.

- Mortes Devidas a Câncer Latente

Na Tabela 3.33 são apresentados os valores médios e máximos do número de mortes devidas a câncer latente, para cada situação. Observou-se que os valores

médios e máximos do número de mortes devidas a câncer latente foram maiores para o acidente postulado no sítio do IPEN, segundo fatores aproximados de 375 e 350, respectivamente. Isto pode ser explicado, uma vez que, conforme observado na referência /52/, este tipo de consequência é previsto com base nas doses coletivas, sendo que a população afetada é um parâmetro muito significativo para este cálculo. Na situação analisada, as doses coletivas para cada órgão considerado, resultantes do acidente postulado para o sítio do IPEN, foram maiores que as resultantes do acidente postulado para a área rural, o que explica o fato de que as mortes devidas a câncer latente tenham ocorrido em maior número na primeira situação.

Tabela 3.33 Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural, condicionais ao termo-fonte SST1. (Hipóteses: distribuição populacional POP1, termo-fonte SST1 e condições meteorológicas MET4).

Localização do Sítio do Reator	Mortes Devidas a Câncer Latente	
	Média	Máximo
Sítio IPEN	424	543
Área Rural	1,13	1,55

Na Tabela 3.34 são apresentados os riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes do acidente com termo-fonte SST1, para as duas situações.

Nas duas situações considerou-se a população existente na área com raio de 75 km, que para o sítio do IPEN totaliza cerca de 14 milhões de habitantes, enquanto que para a área rural é de cerca de 3,5 milhões de habitantes.

Observou-se que tanto o risco social quanto o risco individual de mortes devidas a câncer latente são maiores quando da consideração do acidente no sítio

do IPEN em comparação ao reator localizado na área rural, segundo fatores de aproximadamente 375 e 94, respectivamente.

Tabela 3.34 Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural. (Hipóteses: termo-fonte SST1, condições meteorológicas MET4 e distribuição populacional POP1)

Localização do Sítio do Reator	Risco Social (n° esperado de mortes devidas a câncer latente / ano)	Risco Individual (n° esperado de mortes devidas a câncer latente / pessoa.ano)
Sítio IPEN	$4,24 \times 10^{-3}$	$3,03 \times 10^{-10}$
Área Rural	$1,13 \times 10^{-5}$	$3,23 \times 10^{-12}$

É novamente oportuno observar que, segundo o RSS /5/, a maior parte das mortes devidas a câncer latente são esperadas de 10 a 40 anos após a ocorrência do acidente.

- Nódulos na Tireóide

Na Tabela 3.35 são apresentados os valores médios e máximos do número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, para as duas situações de acidentes.

As maiores ocorrências de nódulos na tireóide foram observadas para o acidente postulado no sítio do IPEN, onde o valor máximo seria de 1.670 indivíduos que desenvolvem os nódulos. De acordo com o Apêndice VI do RSS /5/, espera-se que aproximadamente 40% dos nódulos observados sejam cancerígenos, dos quais 10% seriam letais. Assim sendo, ocorreriam no máximo 67 mortes devidas a câncer na tireóide.

Na Tabela 3.36 são apresentados os riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide, resultantes do acidente com o termo-fonte SST1, para as duas situações.

Tabela 3.35 Valores médios e máximos do número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural, condicionais ao termo-fonte SSTI. (Hipóteses: distribuição populacional POP1, termo-fonte SSTI e condições meteorológicas MET4).

Localização do Sítio do Reator	Nódulos na Tireóide	
	Média	Máximo
Sítio IPEN	1.440	1.670
Área Rural	4,10	6,15

Tabela 3.36 Riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural. (Hipóteses: distribuição populacional POP1, termo-fonte SSTI e condições meteorológicas MET4)

Localização do Sítio do Reator	Risco Social (n° esperado de nódulos na tireóide / ano)	Risco Individual (n° esperado de nódulos na tireóide/pessoa.ano)
Sítio IPEN	$1,44 \times 10^{-2}$	$1,03 \times 10^{-9}$ (a)
Área Rural	$4,10 \times 10^{-5}$	$1,17 \times 10^{-11}$ (b)

(a) Considerou-se uma população de 14 milhões de habitantes.

(b) Considerou-se uma população de 3,5 milhões de habitantes.

Observou-se que tanto o risco social quanto o risco individual de nódulos na tireóide são maiores quando da consideração do acidente no sítio do IPEN em comparação ao reator localizado na área rural, segundo fatores de aproximadamente 351 e 88, respectivamente.

A exemplo das mortes devidas a câncer latente, é importante observar que, segundo o RSS /5/, os nódulos na tireóide são esperados de 10 a 40 anos após a ocorrência do acidente.

- Acréscimo na Taxa de Incidência de Câncer

Para o acidente postulado no sítio do IPEN, ocorreriam, no máximo, 610 mortes devidas a câncer latente, incluindo as mortes devidas a câncer na tireóide.

Como o valor máximo do número de mortes devidas a câncer latente é esperado ocorrer numa direção predominante, considerou-se a população exposta do setor onde foi observado o valor máximo que, para o acidente postulado no sítio do IPEN, é cerca de 1.1 milhões de habitantes.

O CRAC2 considera, no cálculo dos riscos de mortes devidas a câncer latente (exceto leucemia), um período de *plateau* equivalente ao tempo de vida restante do indivíduo. Para efeito de análise, considerou-se, a exemplo do RSS /5/, que as mortes devidas a câncer latente (incluindo leucemia) ocorreriam num período de 30 anos. Desse modo, ter-se-ia que a taxa de incidência de mortes devidas a câncer latente resultantes do acidente seria da ordem de, aproximadamente, 19 mortes por milhão de pessoas por ano, que representa uma taxa significativamente menor que a taxa anual de incidência de mortes devidas a todos os tipos de câncer nos Estados Unidos, que, segundo Sprung /53/, é de 1.800 mortes por milhão de pessoas e, segundo o RSS, é de 1.704 mortes por milhão de pessoas.

A nível de Brasil, de acordo com as estatísticas de mortalidade fornecidas pelo Ministério da Saúde /54/, válidas para o ano de 1985, tem-se que a taxa de incidência de mortes devidas a câncer é de aproximadamente 500 mortes por milhão de pessoas por ano. Desse modo, a taxa resultante do acidente representaria um acréscimo de 3,8% no número de mortes devidas a câncer.

Na comparação realizada entre as conseqüências resultantes do acidente postulado para as duas situações que envolveram diferentes distribuições populacionais, ficou evidente a influência da distribuição populacional na ocorrência de mortes imediatas. É esperada uma maior ocorrência deste tipo de efeito para acidentes em reatores localizados próximos à grandes centros populacionais, uma vez que este tipo de efeito ocorre normalmente em áreas

próximas ao reator, como consequência das altas doses radiológicas associadas, enquanto que para acidentes postulados em reatores localizados numa área rural, tem-se que, tipicamente, as áreas mais densamente povoadas encontram-se não muito próximas do sítio (distâncias da ordem de dezenas de quilómetros), o que resultaria num menor número de mortes imediatas.

3.6.5 Comentários Gerais

É importante notar que, além das incertezas inerentes aos modelos utilizados na análise, os resultados obtidos consideraram que as condições meteorológicas empregadas foram utilizadas de maneira determinística, isto é, foi assumida uma probabilidade igual a 1 para a ocorrência de precipitação e da categoria de estabilidade atmosférica D (assumiu-se também que as condições meteorológicas definidas para o instante correspondente ao início do acidente mantêm-se inalteradas durante todo o transcorrer do mesmo). Esta é uma hipótese conservativa, uma vez que normalmente deveriam ser utilizados dados meteorológicos horários anuais, onde a precipitação num determinado intervalo de tempo ocorre segundo uma probabilidade especificada com base em estatísticas meteorológicas observadas. Dessa forma, é de se supor que os resultados obtidos representem valores superestimados, principalmente com relação às mortes devidas a exposição imediata.

Uma outra observação importante é que, além de restringir o número de habitantes na área em que é esperada a ocorrência de mortes imediatas, a adoção de medidas de emergência nesta área, como por exemplo, a evacuação, pode reduzir significativamente o valor esperado para o número de mortes imediatas, uma vez que ele é muito sensível à adoção destas medidas, conforme demonstrou o estudo realizado por Aldrich et alii /37/.

Capítulo 4

Aplicação ao Reator IEA-R1

Neste capítulo é feita a análise das conseqüências dos acidentes postulados para o reator de referência IEA-R1.

De maneira análoga ao BR3, foram consideradas duas situações distintas:

- O reator localizado num sítio próximo a um grande centro populacional;
- O reator localizado em uma área com características demográficas típicas de uma região rural.

4.1 Descrição do Reator

O IEA-R1 é um reator de pesquisa do tipo piscina aberta, moderado e refrigerado com água leve, utilizando elementos combustíveis do tipo *Materials Testing Reactor* (MTR), sendo utilizado extensivamente na produção de radioisótopos, em análise por ativação, em experiências que utilizam tubos de irradiação e no treinamento de pessoal. O IEA-R1 está localizado dentro dos limites reservados para o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), na Cidade Universitária, em São Paulo /55/.

Atualmente, o IEA-R1 opera com 11 elementos combustíveis com urânio enriquecido a 20% em ^{235}U e 21 elementos com urânio enriquecido a 93% em ^{235}U , a uma potência de 2,0 MWt /56/. No entanto, estão sendo realizados estudos objetivando aumentar a sua potência para 5,0 MWt. Em vista disso, na análise foi considerado o reator operando à potência de 5,0 MWt.

4.2 Inventário Radioativo

O inventário dos radionuclídeos para o reator IEA-R1 foi calculado com o

No cálculo, foram consideradas as seguintes hipóteses:

- O combustível consiste de uma liga de U-Al;
- O reator opera com uma densidade de potência igual a 429 Wt/cm^3 ;
- O inventário foi calculado para o instante correspondente ao início do acidente, após um tempo de irradiação de 162 dias, considerando-se que o reator obedece um regime de operação contínua (24 horas/dia). Este período equivale ao tempo necessário para que ocorra uma troca de combustível no reator.

Foram selecionados 52 radionuclídeos, os quais encontram-se listados na Tabela 4.1, onde é apresentado o inventário dos mesmos.

4.3 Definição das Categorias de Acidentes

Na análise, foram postulados dois tipos de acidentes para o reator IEA-R1: um acidente básico de projeto (ABP), escolhido de maneira a representar o acidente postulado cujo risco potencial ao público é maior que o gerado por qualquer outro acidente considerado crível; e um acidente que representasse um quadro mais realístico, já tendo ocorrido em outros reatores similares ao IEA-R1.

A seguir, são descritos os dois tipos de acidentes, sendo que a postulação dos mesmos baseou-se em estudos anteriores /11/, /12/, /13/, /14/, /20/, /57/, onde foram analisados os mesmos tipos de acidentes em reatores de pesquisa com características semelhantes ao IEA-R1, tal como o *Greek Research Reactor (GRR)*.

O ABP postulado é representado por um acidente de perda de refrigerante (LOCA), acompanhado de um derretimento parcial do núcleo do reator.

A maioria dos estudos efetuados à respeito de acidentes em reatores de pesquisa, especificamente aqueles nos quais são analisados acidentes de perda de

Tabela 4.1 Inventário radioativo do reator IEA-R1.

Número	Nome	Atividade (Ci)
1	Kr-85	7,490E+00
2	Kr-85m	5,990E+02
3	Kr-87	1,050E+03
4	Kr-88	1,400E+03
5	Rb-86	2,200E+00
6	Sr-89	1,620E+03
7	Sr-90	4,740E+01
8	Sr-91	2,660E+03
9	Y-90	5,480E+01
10	Y-91	2,310E+03
11	Zr-95	4,420E+03
12	Zr-97	5,640E+03
13	Nb-95	3,800E+03
14	Mo-99	6,540E+03
15	Tc-99m	5,730E+03
16	Ru-103	6,880E+05
17	Ru-105	5,710E+03
18	Ru-106	1,850E+03
19	Rh-105	4,580E+03
20	Sb-127	5,180E+02
21	Sb-129	1,530E+03
22	Te-127	4,930E+02
23	Te-127m	6,150E+02
24	Te-129	1,510E+03
25	Te-129m	2,700E+02
26	Te-131m	1,140E+03
27	Te-132	5,510E+03
28	I-131	4,070E+03
29	I-132	5,710E+03
30	I-133	7,340E+03
31	I-134	7,700E+03
32	I-135	6,830E+03
33	Xe-133	7,290E+03
34	Xe-135	5,350E+02
35	Cs-134	2,280E+02
36	Cs-136	1,110E+01
37	Cs-137	9,360E+01
38	Ba-140	5,850E+03
39	La-140	6,080E+03
40	Ce-141	5,280E+03
41	Ce-143	4,710E+03
42	Ce-144	1,890E+03
43	Pr-143	1,920E+03
44	Nd-147	2,150E+03
45	Np-239	6,220E+04
46	Pu-238	2,700E+00
47	Pu-239	1,080E+00
48	Pu-240	1,150E+00
49	Pu-241	9,800E+02
50	Am-241	5,620E-02
51	Cm-242	8,130E+01
52	Cm-244	5,600E+00

refrigerante com fusão do núcleo do reator, não leva em consideração a possibilidade de ocorrência deste tipo de acidente. As análises contidas nestes estudos são de natureza determinística, como por exemplo as realizadas por Kollas

et alii /11/, /12/, que apenas postulam a ocorrência deste tipo de acidente.

De maneira a possibilitar a quantificação dos riscos em termos de efeitos na saúde do homem, é necessário que seja conhecida a frequência de ocorrência para este tipo de acidente.

Em 1990, Allen /58/ realizou um estudo onde é apresentado um exemplo da aplicação de técnicas de análise probabilística a reatores do tipo MTR que operam à potência de 10 MWt. Foi analisado um acidente que consiste da perda de refrigerante devida a uma falha na tubulação do circuito de refrigeração do reator.

O reator analisado por Allen /58/ utiliza água pesada (D₂O) como refrigerante e moderador, a qual é circulada através do núcleo por meio de um circuito de refrigeração à baixa pressão, ao contrário do que ocorre com a maioria dos reatores de potência.

Allen /58/ estimou que a frequência anual de fusão do núcleo, como resultado da perda de refrigerante, estaria entre $2,1 \times 10^{-6}$ e $6,8 \times 10^{-7}$.

Apesar do reator em questão operar a uma potência de 10 MWt, o mesmo apresenta características comuns com o reator IEA-R1, pois ambos utilizam combustível do tipo MTR e seus circuitos primários de refrigeração operam à baixa pressão. Desse modo, para efeito de análise, no presente estudo julgou-se razoável a aplicação dos valores estimados por Allen /58/ ao reator IEA-R1, optando-se por utilizar o valor mais pessimista, que é $2,1 \times 10^{-6}$.

Baseado no estudo desenvolvido por Bartzis /59/, considerou-se, conservativamente, que o derretimento do núcleo do reator abrangeu 20% do mesmo, sob as condições mais adversas, isto é, ocorreu uma rápida perda da água da piscina através da ruptura completa da tubulação de entrada ou saída de refrigerante, conectada ao fundo da piscina do reator.

No cálculo do termo-fonte do ABP foram adotadas as seguintes hipóteses conservativas:

- A liberação de radionuclídeos para a atmosfera ocorreu imediatamente após o início do acidente (tempo de liberação = 0);
- Não foi considerada a ação de filtros no sistema de ventilação;
- A liberação ocorreu ao nível do solo.

O outro acidente postulado consistiu do bloqueio da entrada de refrigerante em um ou mais elementos combustíveis, e foi denominado ABER. Conforme observou Williams et alii /20/, este tipo de acidente é aquele que, dentre os possíveis acidentes, apresenta a maior frequência de ocorrência. Segundo Baggentos /60/, a frequência anual de ocorrência deste tipo de acidente é $4,88 \times 10^{-4}$.

Este acidente teve como causa a queda inadvertida e a deposição de materiais estranhos sobre um ou mais elementos combustíveis, bloqueando, assim, o fluxo de refrigerante através dos mesmos. A redução do fluxo de refrigerante causou um superaquecimento no local, acompanhado de falha no encamisamento. Acidentes deste tipo já ocorreram, conforme observou Kollas et alii /57/, em pelo menos três reatores com características semelhantes ao IEA-R1.

Kollas et alii /57/ também observou, com base em acidentes ocorridos, que somente uma parte dos elementos combustíveis está sujeita ao derretimento. Nesta análise, foram consideradas, conservativamente, as mesmas hipóteses adotadas por Kollas et alii /57/, a saber:

- a) O bloqueio de refrigerante ocorreu em 6 elementos combustíveis;
- b) Houve o derretimento de 50% de cada elemento (50% de falha);
- c) Como foram afetados 6 dentre 32 elementos combustíveis, com 50% de falha, teve-se que 9,375% do inventário total foi afetado;
- d) Do inventário acima, teve-se que 100% dos gases nobres, 5% do inventário dos isótopos do iodo e 0,1% dos outros produtos de fissão foram liberados para o interior do prédio do reator;
- e) Os produtos de fissão foram liberados para a atmosfera através da chaminé,

passando por um sistema de filtros com eficiência de retenção de 90% para os isótopos do iodo e 95% para os outros particulados. Os gases nobres não são retidos pelos filtros;

f) A altura de liberação considerada foi de 30 metros.

Um resumo dos termos-fonte, com os parâmetros associados às liberações, para o ABP e o ABER, é mostrado na Tabela 4.2.

As atividades dos radionuclídeos, no momento da liberação, são apresentadas na Tabela 4.3.

4.4 Meteorologia

Os cenários meteorológicos considerados, assim como as hipóteses empregadas, são idênticos aos que foram utilizados na análise realizada com o reator BR3 (ver seção 3.4).

4.5 Distribuição Populacional

As distribuições populacionais consideradas, assim como as hipóteses empregadas, são idênticas àquelas utilizadas na análise relativa ao reator BR3 (ver seção 3.5).

4.6 Análise dos Resultados

Uma vez definidos os dados essenciais para a realização da análise de conseqüências, tais como o inventário radioativo, os termos-fonte dos acidentes postulados, as condições meteorológicas e a distribuição populacional, passa-se à fase em que será analisada a influência de fatores tais como termo-fonte, meteorologia e distribuição populacional nos resultados da análise.

Foram analisados os seguintes tipos de conseqüências:

- mortes imediatas;

- mortes devidas a câncer latente, calculadas considerando-se órgãos individuais (excluindo a tireóide);
- nódulos (benignos e malignos) na tireóide.

Tabela 4.2 Resumo das liberações e parâmetros associados para cada acidente.

Características da Liberação ^(a)	Acidente	
	ABP	ABER
Tempo de Liberação (h)	0,0	0,0
Duração da Liberação (h)	10,0	10,0
Altura da Liberação (m)	0,0	30,0
Energia Associada à Lib.	0,0	0,0
Fração do Núcleo Derretido (%)	20,0	9,375
<u>Frações de Liberação</u>		
Xe-Kr	1,0	$9,375 \times 10^{-2}$
I	0,5	$4,688 \times 10^{-4}$
Cs-Rb	0,01	$4,688 \times 10^{-6}$
Te-Sb	0,01	$4,688 \times 10^{-6}$
Ba-Sr	0,01	$4,688 \times 10^{-6}$
Ru	0,01	$4,688 \times 10^{-6}$
La	0,01	$4,688 \times 10^{-6}$

(a) Como definidas no RSS /5/.

4.6.1 Influência do Termo-Fonte

Analisou-se a influência de termos-fonte distintos, com o reator localizado numa área urbana. Para todos os casos analisados, considerou-se a

Tabela 4.3 Atividades dos radionuclídeos no momento da liberação (em Ci).

Número	Radionuc.	ATIVIDADE (Ci)	
		ABP	ABER
1	Kr-85	7,490E+00	7,020E-01
2	Kr-85m	5,990E+02	5,620E+01
3	Kr-87	1,050E+03	9,840E+01
4	Kr-88	1,400E+03	1,310E+02
5	Rb-86	2,200E-02	1,030E-05
6	Sr-89	1,620E+01	7,590E-03
7	Sr-90	4,740E-01	2,220E-04
8	Sr-91	2,660E+01	1,250E-02
9	Y-90	5,480E-01	2,570E-04
10	Y-91	2,310E+01	1,080E-02
11	Zr-95	4,420E+01	2,070E-02
12	Zr-97	5,640E+01	2,640E-02
13	Nb-95	3,800E+01	1,780E-02
14	Mo-99	6,540E+01	3,070E-02
15	Tc-99m	5,730E+01	2,690E-02
16	Ru-103	6,880E+03	3,230E+00
17	Ru-105	5,710E+01	2,680E-02
18	Ru-106	1,850E+01	8,670E-03
19	Rh-105	4,580E+01	2,150E-02
20	Sb-127	5,180E+00	2,430E-03
21	Sb-129	1,530E+01	7,170E-03
22	Te-127	4,930E+00	2,310E-03
23	Te-127m	6,150E+00	2,880E-03
24	Te-129	1,510E+01	7,080E-03
25	Te-129m	2,700E+00	1,270E-03
26	Te-131m	1,140E+01	5,340E-03
27	Te-132	5,510E+01	2,580E-02
28	I-131	2,040E+03	1,910E+00
29	I-132	2,860E+03	2,680E+00
30	I-133	3,670E+03	3,440E+00
31	I-134	3,850E+03	3,610E+00
32	I-135	3,420E+03	3,200E+00
33	Xe-133	7,290E+03	6,830E+02
34	Xe-135	5,350E+02	5,020E+01
35	Cs-134	2,280E+00	1,070E-03
36	Cs-136	1,110E-01	5,200E-05
37	Cs-137	9,360E-01	4,390E-04
38	Ba-140	5,850E+01	2,740E-02
39	La-140	6,080E+01	2,850E-02
40	Ce-141	5,280E+01	2,480E-02
41	Ce-143	4,710E+01	2,210E-02
42	Ce-144	1,890E+01	8,860E-03
43	Pr-143	1,920E+01	9,000E-03
44	Nd-147	2,150E+01	1,010E-02
45	Np-239	6,220E+02	2,920E-01
46	Pu-238	2,700E-02	1,270E-05
47	Pu-239	1,080E-02	5,060E-06
48	Pu-240	1,150E-02	5,390E-06
49	Pu-241	9,800E+00	4,590E-03
50	Am-241	5,620E-04	2,630E-07
51	Cm-242	8,130E-01	3,810E-04
52	Cm-244	5,600E-02	2,630E-05

distribuição populacional POP1 (ver Tabela 3.6) e as condições meteorológicas correspondentes a MET4, com o reator situado no sítio do IPEN. Os termos-fonte utilizados correspondem aos acidentes ABP e ABER, definidos na seção 4.3.

- Mortes Imediatas

Na análise, foi observada a não ocorrência de mortes devidas a exposição imediata, para os dois acidentes. Isto deveu-se a que as doses imediatas resultantes, nos dois casos, estavam muito abaixo do limiar de dose para a ocorrência deste tipo de efeito. Na Figura 4.1 são apresentados os valores médios das doses imediatas na medula óssea, em função da distância, uma vez que a irradiação da medula óssea predomina quanto a ocorrência de mortes imediatas. Desta figura, observou-se que as maiores doses ocorridas, para os dois acidentes, estavam muito abaixo do limiar de dose para a ocorrência de mortes imediatas, que é de 3,2 Sv para a medula óssea /1/, /8/.

- Mortes Devidas a Câncer Latente

Na Tabela 4.4 são apresentados os valores médios e máximos do número de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos dois acidentes. As curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente são apresentadas na Figura 4.2. Os resultados obtidos são condicionais à ocorrência dos termos-fonte do ABP e do ABER (probabilidade de ocorrência igual a 1).

Observou-se que os valores médios e máximos do número de mortes devidas a câncer latente são significativamente maiores no caso da ocorrência do ABP, segundo um fator de aproximadamente $1,8 \times 10^3$. Isto deveu-se a que as doses coletivas, para cada órgão, resultantes do ABP são maiores que as resultantes do ABER, uma vez que o ABP resultou numa maior liberação de radionuclídeos para o meio ambiente, ou seja, o termo-fonte do ABP resultou numa maior liberação de gases nobres, iodo e demais produtos de fissão, da ordem de 10 , 10^3 e 10^3 , respectivamente, com relação à liberação dos mesmos grupos de radionuclídeos liberados no ABER.

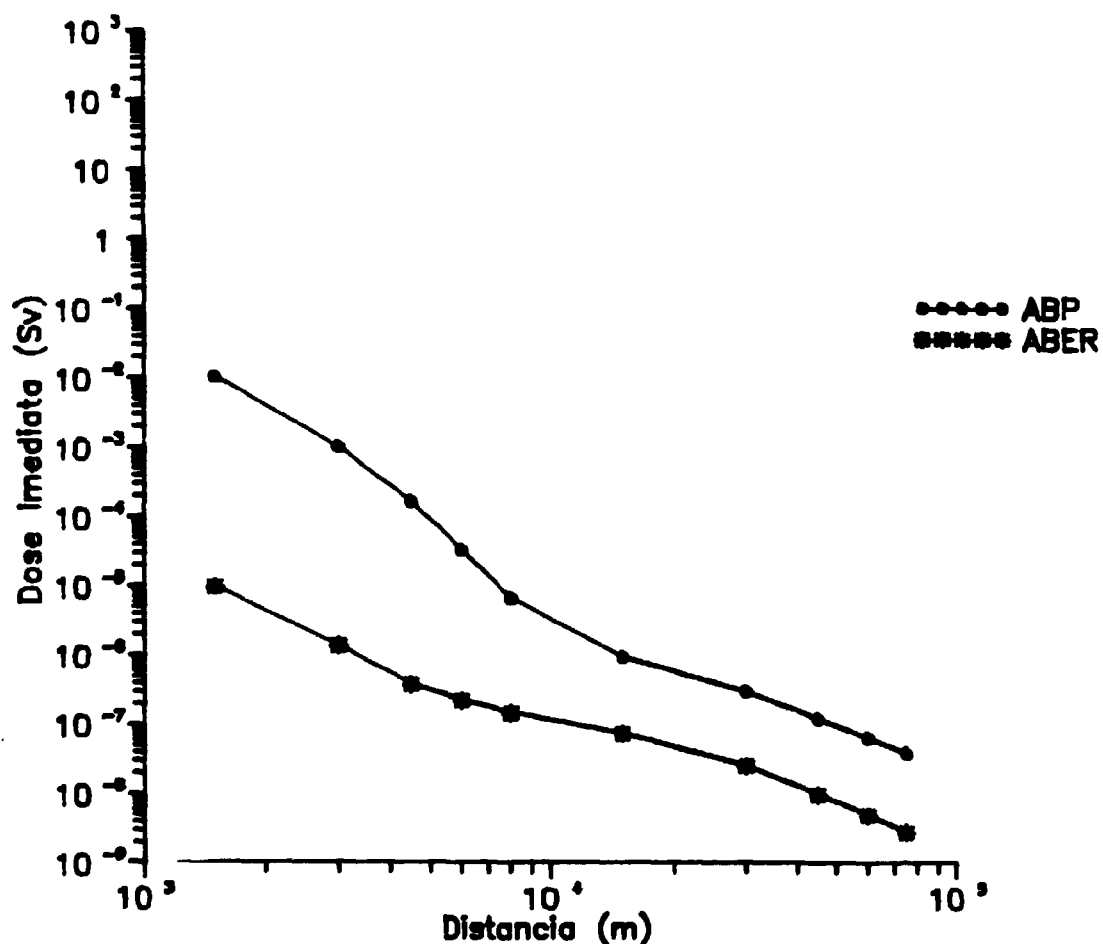


Figura 4.1 Valores médios das doses imediatas na medula óssea, em função da distância, condicionais aos termos-fonte do ABP e do ABER. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4)

Tabela 4.4 Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, condicionais aos termos-fonte do ABP e do ABER. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4).

Acidente	Mortes Devidas a Câncer Latente	
	Média	Máximo
ABP	13,9	15,3
ABER	$7,70 \times 10^{-3}$	$8,50 \times 10^{-3}$

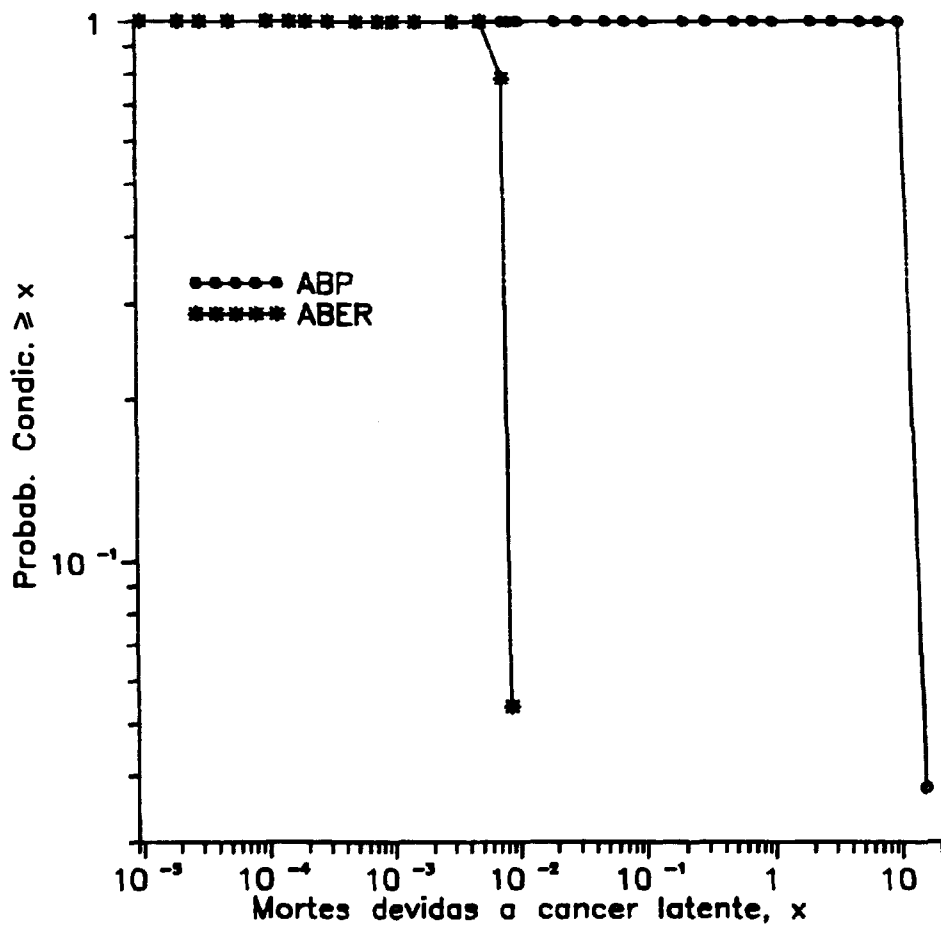


Figura 4.2 Curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente, condicionais aos termos-fonte do ABP e do ABER. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4)

- Nódulos na Tireóide

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide. Na Figura 4.3 são apresentadas as curvas CCDF para esta variável, resultantes dos dois acidentes. Os resultados obtidos são condicionais à ocorrência dos termos-fonte do ABP e do ABER.

Com relação ao número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, observou-se um comportamento semelhante ao do número de mortes devidas a câncer

latente. A variação entre as magnitudes foi da ordem de aproximadamente $1,7 \times 10^3$, tanto para os valores médios quanto para os valores máximos.

Tabela 4.5 Valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, condicionais aos termos-fonte do ABP e do ABER. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4).

Acidente	Nódulos na Tireóide	
	Média	Máximo
ABP	75,9	83,5
ABER	$4,40 \times 10^{-2}$	$4,85 \times 10^{-2}$

As observações anteriores vêm a confirmar o que já havia ficado evidente na análise realizada com o reator BR3, ou seja, a ocorrência de mortes devidas a câncer latente e de nódulos na tireóide é fortemente sensível à magnitude do termo-fonte.

- Risco ao Público

De maneira análoga à análise realizada na seção 3.6, foram calculados os riscos sociais e individuais resultantes dos acidentes ABP e ABER. Nos cálculos foram consideradas as freqüências anuais de ocorrência de cada acidente (ver seção 4.3) e os valores médios de cada consequência.

O risco de mortes imediatas resultante dos acidentes ABP e ABER é zero, uma vez que para estas situações de acidentes não foi observada a ocorrência de mortes imediatas.

Na Tabela 4.6 são apresentados os riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos acidentes ABP e ABER. No cálculo do risco individual foi considerada a população existente na área com 75 km de raio, que totaliza cerca de 14 milhões de habitantes.

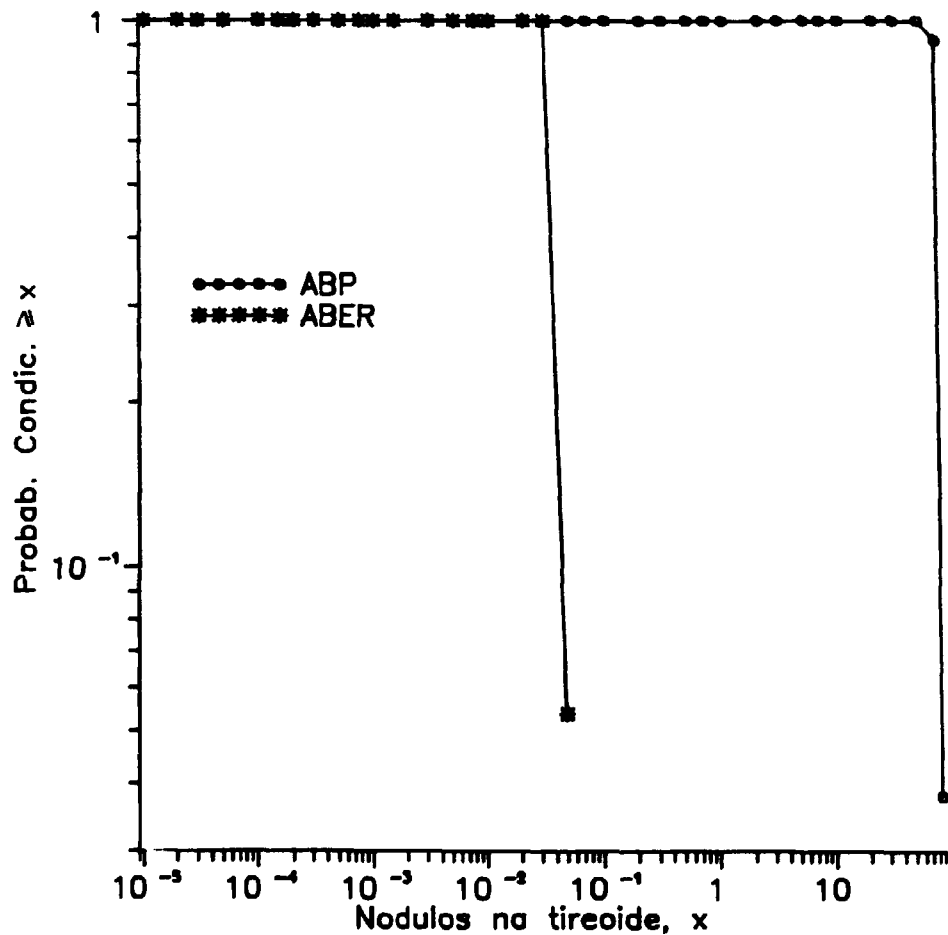


Figura 4.3 Curvas CCDF para o número de nódulos na tireóide, condicionais aos termos-fonte do ABP e do ABER. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4)

Tabela 4.6 Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos acidentes ABP e ABER. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4)

Acidente	Risco Social (n° esperado de mortes devidas a câncer laten- te / ano)	Risco Individual (n° esperado de mortes devidas a câncer laten- te / pessoa.ano)
ABP	$2,92 \times 10^{-5}$	$2,09 \times 10^{-12}$
ABER	$3,76 \times 10^{-6}$	$2,69 \times 10^{-13}$

Observou-se que a variação entre os riscos sociais e entre os riscos individuais de mortes devidas a câncer latente foi da ordem de aproximadamente

7.8. Esta pequena diferença deve-se a que, apesar do ABP produzir um maior número de mortes devidas a câncer latente com relação ao ABER, este último possui uma frequência anual de ocorrência cerca de 232 vezes maior que a do ABP, contribuindo assim para um aumento dos riscos resultantes do ABER.

Na Tabela 4.7 são apresentados os riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide resultantes dos acidentes ABP e ABER.

Tabela 4.7 Riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide, resultantes dos acidentes ABP e ABER. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zona urbana) e condições meteorológicas MET4)

Acidente	Risco Social (n° esperado de nódulos na tireóide / ano)	Risco Individual (a) (n° esperado de nódulos na tireóide/pessoa.ano)
ABP	$1,59 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-11}$
ABER	$2,15 \times 10^{-6}$	$1,54 \times 10^{-12}$

(a) Foi considerada uma população de 14 milhões de habitantes.

Observou-se que a variação entre os riscos sociais e entre os riscos individuais de nódulos na tireóide foi da ordem de aproximadamente 7,4.

4.6.2 Influência das Condições Meteorológicas

Analisou-se a influência exercida pelas diferentes condições meteorológicas definidas anteriormente (MET1 a MET12).

Em todos os casos analisados, foram considerados o termo-fonte do ABP e a distribuição populacional POP1 (ver Tabela 3.6), para o reator localizado no sítio do IPEN.

- Mortes Imediatas

Na análise de todos os casos, a exemplo da análise anterior, não foi observada a ocorrência de mortes devidas a exposição imediata.

- Mortes Devidas a Câncer Latente

Na Tabela 4.8 são apresentados os valores médios e máximos do número de mortes devidas a câncer latente, resultantes de todos os experimentos (MET1 a MET12). As curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente são apresentadas na Figura 4.4. Os resultados obtidos são condicionais ao termo-fonte do ABP.

Tabela 4.8 Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte do ABP. (Hipóteses: termo-fonte do ABP e distribuição populacional POP1 (zona urbana))

Experi- mento	Mortes Devidas a Câncer Latente	
	Média	Máximo
MET1	5,06	5,77
MET2	9,25	11,0
MET3	1,49	1,70
MET4	13,9	15,3
MET5	13,6	15,9
MET6	14,3	15,5
MET7	13,4	14,8
MET8	10,2	12,1
MET9	14,2	15,4
MET10	13,9	15,3
MET11	13,5	15,8
MET12	14,3	15,5

Da Tabela 4.8 e da Figura 4.4, observou-se que os experimentos que não consideraram a ocorrência de precipitação (MET1 a MET3), resultaram em menores valores, médios e máximos, quando comparados aos experimentos que consideraram a ocorrência de precipitação (MET4 a MET12).

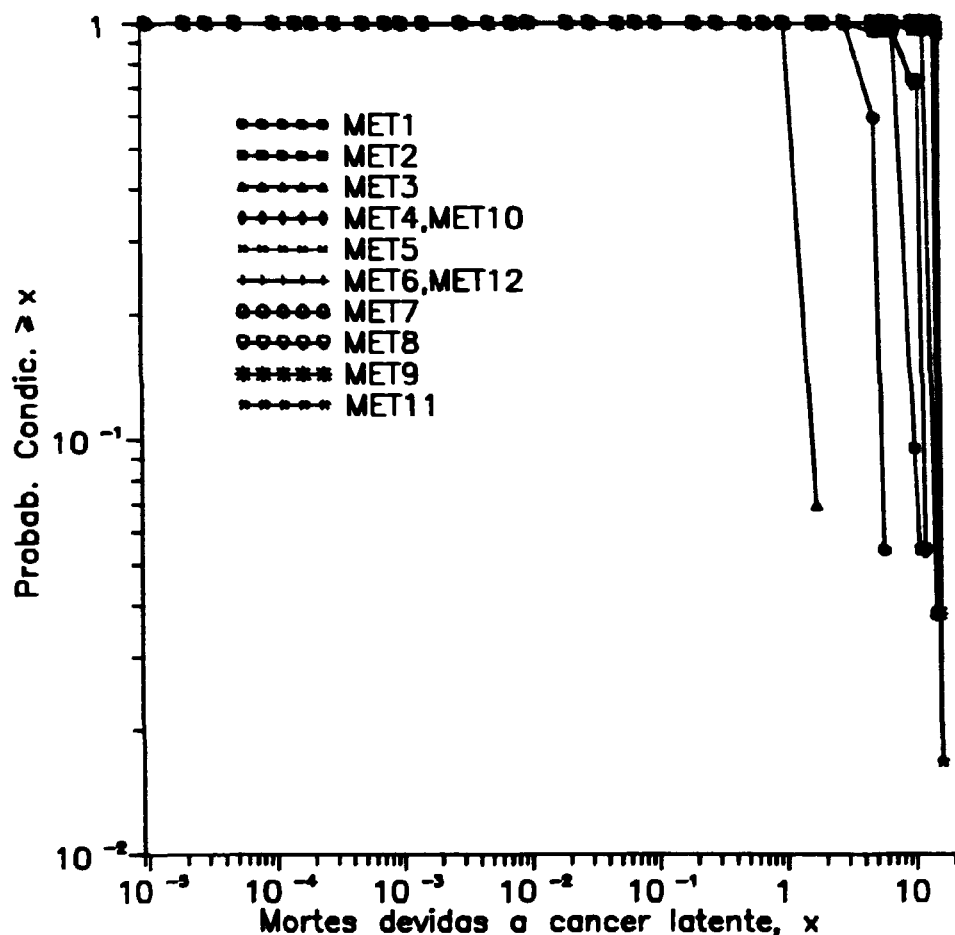


Figura 4.4 Curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte do ABP. (Hipóteses: termo-fonte do ABP e distribuição populacional POP1 (zona urbana))

Observou-se que a maior variação entre as magnitudes das mortes devidas a câncer latente ocorreu segundo um fator de aproximadamente 10, tanto para os valores médios quanto para os valores máximos.

Nos experimentos que consideraram a ocorrência de precipitação (MET4 a MET12), observou-se que para os casos com categorias de estabilidade B e D, mais de 90% das mortes devidas a câncer latente ocorreram nos dois primeiros intervalos espaciais (raio igual a 3 km). Por outro lado, para a categoria de estabilidade F, aproximadamente 95% das mortes ocorreram nos seis primeiros intervalos (raio igual a 15 km). Ficou evidente, portanto, que as categorias de estabilidade menos

estáveis (B e D) são mais afetadas pela ocorrência de precipitação, com uma deposição de radionuclídeos mais acentuada, do que as categorias de estabilidade mais estáveis (F, no caso).

- Nódulos na Tireóide

Na Tabela 4.9 são apresentados os valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide. Na Figura 4.5 são apresentadas as curvas CCDF para esta variável, resultantes dos experimentos MET1 a MET12. Os resultados obtidos são condicionais ao termo-fonte do ABP.

Tabela 4.9 Valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte do ABP. (Hipóteses: termo-fonte do ABP e distribuição populacional POP1 (zona urbana))

Experi- mento	Nódulos na Tireóide	
	Média	Máximo
MET1	56,6	64,9
MET2	127,0	159,0
MET3	15,1	17,2
MET4	75,9	83,5
MET5	118,0	137,0
MET6	71,8	77,6
MET7	74,5	82,3
MET8	117,0	144,0
MET9	71,3	77,1
MET10	75,9	83,5
MET11	118,0	137,0
MET12	71,8	77,6

Observou-se que a maior variação entre os valores médios ocorreu segundo um fator de aproximadamente 8,4, enquanto que para os valores máximos a variação

ocorreu segundo um fator de aproximadamente 9,2.

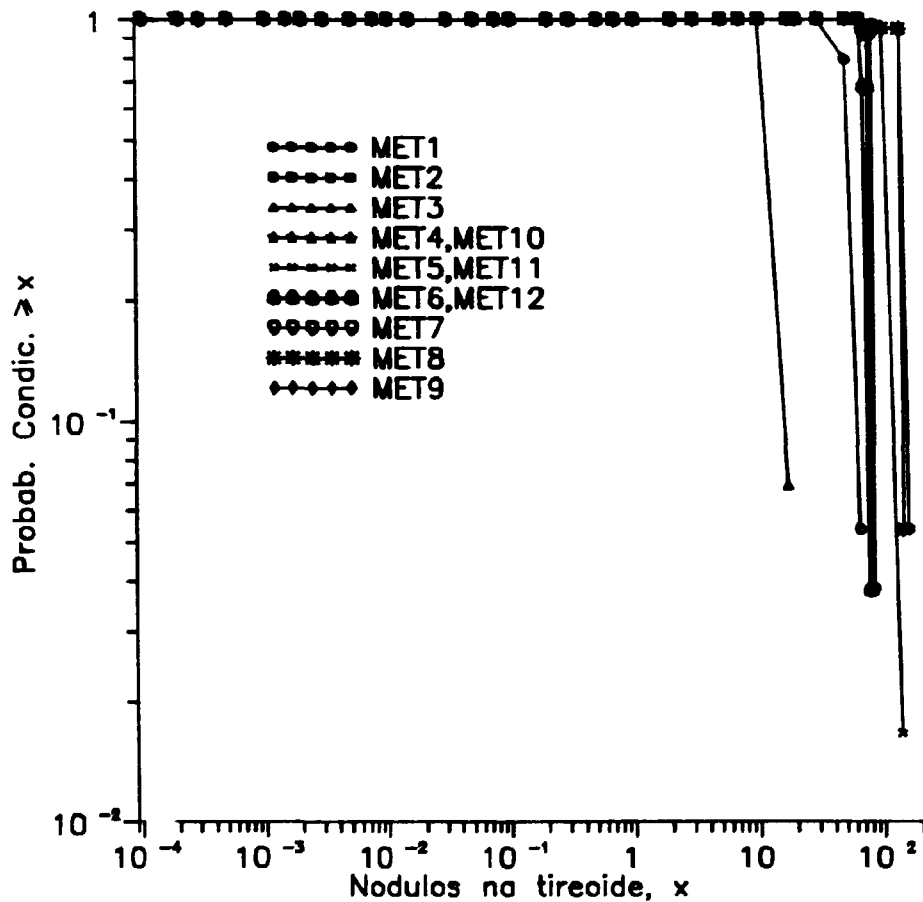


Figura 4.5 Curvas CCDF para o número de nódulos na tireóide, resultantes dos experimentos MET1 a MET12, condicionais ao termo-fonte do ABP. (Hipóteses: termo-fonte do ABP e distribuição populacional POP1 (zona urbana))

Em resumo, ficou evidenciado que a influência exercida pelas diferentes condições meteorológicas afetou de maneira pouco significativa a ocorrência de efeitos latentes, quando comparada com a influência exercida pelos diferentes termos-fonte considerados na análise.

- Risco ao Público

O risco de mortes imediatas resultante dos experimentos MET1 a MET12 é zero, uma vez que para estas situações não foi observada a ocorrência de mortes imediatas.

Na Tabela 4.10 são apresentados os riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente resultantes dos experimentos MET1 a MET12.

Tabela 4.10 Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos experimentos MET1 a MET12. (Hipóteses: termo-fonte do ABP e distribuição populacional POP1 (zona urbana))

Experimento	Risco Social (n° esperado de mortes devidas a câncer laten- te / ano)	Risco Individual (a) (n° esperado de mortes devidas a câncer laten- te / pessoa.ano)
MET1	$1,06 \times 10^{-5}$	$7,57 \times 10^{-13}$
MET2	$1,94 \times 10^{-5}$	$1,39 \times 10^{-12}$
MET3	$3,14 \times 10^{-6}$	$2,24 \times 10^{-13}$
MET4	$2,92 \times 10^{-5}$	$2,09 \times 10^{-12}$
MET5	$2,85 \times 10^{-5}$	$2,04 \times 10^{-12}$
MET6	$3,01 \times 10^{-5}$	$2,15 \times 10^{-12}$
MET7	$2,81 \times 10^{-5}$	$2,01 \times 10^{-12}$
MET8	$2,15 \times 10^{-5}$	$1,54 \times 10^{-12}$
MET9	$2,99 \times 10^{-5}$	$2,14 \times 10^{-12}$
MET10	$2,92 \times 10^{-5}$	$2,09 \times 10^{-12}$
MET11	$2,83 \times 10^{-5}$	$2,02 \times 10^{-12}$
MET12	$3,01 \times 10^{-5}$	$2,15 \times 10^{-12}$

(a) Considerou-se uma população de 14 milhões de habitantes.

Observou-se que a maior variação experimentada, tanto pelos riscos sociais quanto pelos riscos individuais, foi da ordem de aproximadamente 10.

Na Tabela 4.11 são apresentados os riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide, resultantes dos experimentos MET1 a MET12.

Observou-se que a maior variação experimentada, tanto pelos riscos sociais quanto pelos riscos individuais de nódulos na tireóide, foi da ordem de aproximadamente 8,4.

Tabela 4.11 Riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide resultantes dos experimentos MET1 a MET12. (Hipóteses: termo-fonte do ABP e distribuição populacional POP1 (zona Urbana))

Experimento	Risco Social (n° esperado de nódulos na tireóide / ano)	Risco Individual (a) (n° esperado de nódulos na tireóide/pessoa.ano)
MET1	$1,19 \times 10^{-4}$	$8,50 \times 10^{-12}$
MET2	$2,68 \times 10^{-4}$	$1,91 \times 10^{-11}$
MET3	$3,18 \times 10^{-5}$	$2,27 \times 10^{-12}$
MET4	$1,59 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-11}$
MET5	$2,47 \times 10^{-4}$	$1,76 \times 10^{-11}$
MET6	$1,51 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-11}$
MET7	$1,56 \times 10^{-4}$	$1,11 \times 10^{-11}$
MET8	$2,45 \times 10^{-4}$	$1,75 \times 10^{-11}$
MET9	$1,50 \times 10^{-4}$	$1,07 \times 10^{-11}$
MET10	$1,59 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-11}$
MET11	$2,47 \times 10^{-4}$	$1,76 \times 10^{-11}$
MET12	$1,51 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-11}$

(a) Considerou-se uma população de 14 milhões de habitantes.

4.6.3 Influência da Distribuição Populacional

Na análise da influência exercida pelas diferentes distribuições populacionais (POP1 a POP9), considerou-se o termo-fonte correspondente ao ABP e a condição meteorológica MET4, com o reator localizado no sítio do IPEN.

- Mortes Imediatas

A exemplo das análises anteriores, para todos os casos analisados não foi observada a ocorrência de mortes devidas a exposição imediata.

- Mortes Devidas a Câncer Latente

Na Tabela 4.12, são apresentados os valores médios e máximos do número de mortes devidas a câncer latente, assim como a probabilidade de ocorrência de no

mínimo uma morte e a probabilidade de ocorrência do valor máximo. Na Figura 4.6 são apresentadas as curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes de todas as distribuições populacionais (POP1 a POP9). Os resultados obtidos são condicionais ao termo-fonte do ABP.

Tabela 4.12 Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9, condicionais ao termo-fonte do ABP. (Hipóteses: termo-fonte do ABP e condições meteorológicas MET4).

Distribuição	Média	$P(\geq 1)$ *	Máximo	P_{max} .
POP1	13,9	1,0	15,3	$3,79 \times 10^{-2}$
POP2	1,27	1,0	1,27	1,0
POP3	1,33	$2,06 \times 10^{-1}$	8,89	$4,96 \times 10^{-2}$
POP4	$1,64 \times 10^{-1}$	$4,96 \times 10^{-2}$	1,10	$4,96 \times 10^{-2}$
POP5	$4,78 \times 10^{-2}$	0	$3,46 \times 10^{-1}$	$4,96 \times 10^{-2}$
POP6	$1,28 \times 10^{-2}$	0	$9,65 \times 10^{-2}$	$4,96 \times 10^{-2}$
POP7	$3,62 \times 10^{-3}$	0	$2,68 \times 10^{-2}$	$4,96 \times 10^{-2}$
POP8	$3,33 \times 10^{-4}$	0	$5,48 \times 10^{-4}$	$4,96 \times 10^{-2}$
POP9	$2,74 \times 10^{-4}$	0	$8,42 \times 10^{-4}$	$4,96 \times 10^{-2}$

* $P(\geq 1)$ = probabilidade de ocorrência de no mínimo uma morte devida a câncer latente.

Da comparação de POP2 (distribuição homogênea) com POP1 (distribuição "real"), observou-se que os valores médios e máximos do número de mortes devidas a câncer latente resultantes de POP1, são cerca de 11 e 12 vezes maiores em relação aos valores resultantes de POP2, respectivamente. Isto ocorreu uma vez que POP1 não possui uma distribuição populacional uniforme, apresentando irregularidades características de uma distribuição real de população, tais como a existência de setores contendo grandes centros de população, onde a densidade populacional é maior que a da distribuição POP2 (densidade populacional uniforme).

Comparando-se POP2 com POP3 (toda a população encontra-se num único setor

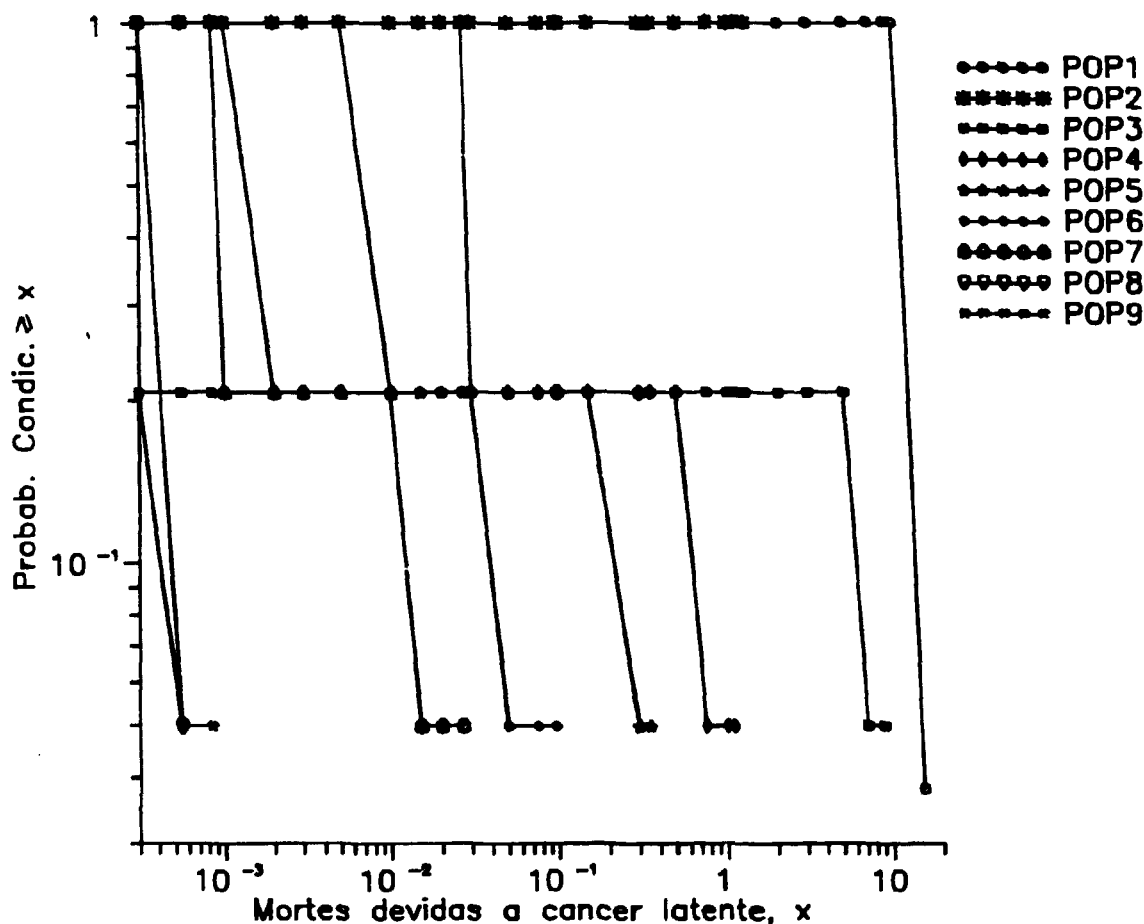


Figura 4.6 Curvas CCDF para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9, condicionais ao termo-fonte do ABP. (Hipóteses: termo-fonte do ABP e condições meteorológicas MET4)

de $22,5^\circ$), observou-se que o valor máximo do número de mortes devidas a câncer latente resultante de POP3 é maior que para POP2, segundo um fator de aproximadamente 7. Isto se explica, uma vez que em POP3, devido toda a população encontrar-se num único setor, a densidade de população é maior do que em POP2 (exatamente segundo um fator de 16). Com relação à probabilidade de ocorrência de no mínimo uma morte, observou-se que para POP3 ela é aproximadamente 5 vezes menor que para POP2. Isto ocorreu, uma vez que em POP3, 15 setores permaneceram vazios, reduzindo assim a probabilidade de ocorrência destes efeitos, pois, como na estimativa destes efeitos considerou-se todos os 16 setores (os resultados levaram em conta a frequência de direção do vento), aumenta a probabilidade de que a pluma atravesse setores em que não há população, diminuindo portanto a probabilidade de

que a pluma passe apenas por um único setor.

As distribuições POP4 a POP9, apesar de distintas, possuem em comum a característica de apresentarem vários espaços (intervalos espaciais) vazios, isto é, sem nenhuma população. Na comparação entre POP2 e as referidas distribuições, observou-se que a probabilidade de ocorrência de no mínimo uma morte, para estas distribuições, são menores em relação a POP2, evidenciando assim, como na análise com o reator BR3, que a existência de espaços vazios nas distribuições consideradas contribuíram de maneira significativa para o decréscimo da probabilidade de ocorrência deste tipo de consequência. Do mesmo modo, observou-se que os valores máximos do número de mortes devidas a câncer latente resultantes das distribuições POP4 a POP9 foi menor que para POP2.

Comparando-se todas as distribuições populacionais, através da análise conjunta da Tabela 4.12 e da Figura 4.6, observou-se que a variação entre os valores médios e máximos do número de mortes devidas a câncer latente ocorreu segundo fatores aproximados de 5×10^4 e $2,8 \times 10^4$, respectivamente. Com relação às probabilidades de ocorrência de no mínimo uma morte, observou-se que as mesmas variaram de 0 a 1.

- Nódulos na Tireóide

Na Tabela 4.13 são apresentados os valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, assim como as probabilidades de ocorrência de no mínimo um nódulo e do valor máximo. Na Figura 4.7 são mostradas as curvas CCDF para esta variável, resultantes das distribuições POP1 a POP9. Os resultados obtidos são condicionais ao termo-fonte do ABP.

Observou-se que a maior variação entre os valores médios ocorreu segundo um fator de $5,5 \times 10^4$, enquanto que para os valores máximos este fator foi de aproximadamente 3×10^4 . Com relação às probabilidades de ocorrência de no mínimo um nódulo, a variação observada foi de 0 a 1.

Tabela 4.13 Valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9, condicionais ao termo-fonte do ABP. (Hipóteses: termo-fonte do ABP e condições meteorológicas MET4).

Distribuição	Média	$P(\geq 1)^*$	Máximo	$P_{max.}$
POP1	75,9	1,0	83,5	$3,79 \times 10^{-2}$
POP2	6,91	1,0	6,91	1,0
POP3	7,26	$2,06 \times 10^{-1}$	48,3	$4,96 \times 10^{-2}$
POP4	$8,55 \times 10^{-1}$	$2,06 \times 10^{-1}$	5,74	$4,96 \times 10^{-2}$
POP5	$2,46 \times 10^{-1}$	$4,96 \times 10^{-2}$	1,78	$4,96 \times 10^{-2}$
POP6	$6,53 \times 10^{-2}$	0	$4,92 \times 10^{-1}$	$4,96 \times 10^{-2}$
POP7	$1,85 \times 10^{-2}$	0	$1,37 \times 10^{-1}$	$4,96 \times 10^{-2}$
POP8	$1,68 \times 10^{-3}$	0	$2,76 \times 10^{-3}$	$4,96 \times 10^{-2}$
POP9	$1,38 \times 10^{-3}$	0	$4,24 \times 10^{-3}$	$4,96 \times 10^{-2}$

* $P(\geq 1)$ = probabilidade de ocorrência de no mínimo um nódulo na tireóide.

De maneira geral, observou-se que as várias distribuições populacionais influenciaram de maneira semelhante tanto o número de mortes devidas a câncer latente quanto o número de nódulos na tireóide.

- Risco ao Público

O risco de mortes imediatas resultante das distribuições populacionais POP1 a POP9 é zero, uma vez que para estas situações não foi observada a ocorrência de mortes imediatas.

Na Tabela 4.14 são apresentados os riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9.

Observou-se que a maior variação experimentada, tanto pelos riscos sociais quanto pelos riscos individuais de mortes devidas a câncer latente, foi da ordem

de aproximadamente 5×10^4 .

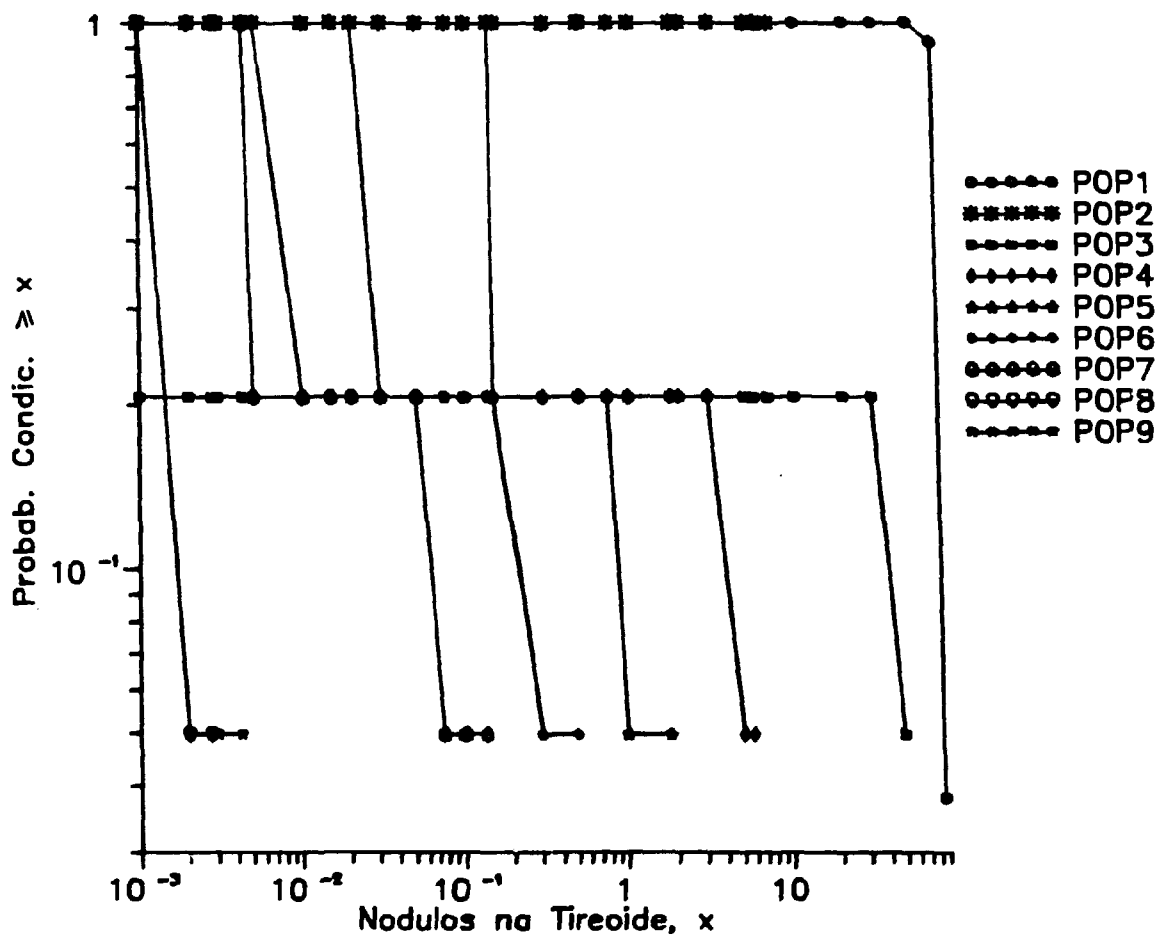


Figura 4.7 Curvas CCDF para o número de nódulos na tireóide, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9, condicionais ao termo-fonte do ABP. (Hipóteses: termo-fonte do ABP e condições meteorológicas MET4)

Na Tabela 4.15 são apresentados os riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9.

Observou-se que a maior variação experimentada, tanto pelos riscos sociais quanto pelos riscos individuais de nódulos na tireóide, foi da ordem de aproximadamente $5,5 \times 10^4$.

Tabela 4.14 Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9. (Hipóteses: termo-fonte do ABP e condições meteorológicas MET4)

Distribuição.	Risco Social (n° esperado de mortes devidas a câncer laten- te / ano)	Risco Individual (a) (n° esperado de mortes devidas a câncer laten- te / pessoa.ano)
POP1	$2,92 \times 10^{-5}$	$2,09 \times 10^{-12}$
POP2	$2,66 \times 10^{-6}$	$1,90 \times 10^{-13}$
POP3	$2,80 \times 10^{-6}$	$2,00 \times 10^{-13}$
POP4	$3,44 \times 10^{-7}$	$2,46 \times 10^{-14}$
POP5	$1,00 \times 10^{-7}$	$7,14 \times 10^{-15}$
POP6	$2,68 \times 10^{-8}$	$1,91 \times 10^{-15}$
POP7	$7,60 \times 10^{-9}$	$5,43 \times 10^{-16}$
POP8	$6,98 \times 10^{-10}$	$4,99 \times 10^{-17}$
POP9	$5,75 \times 10^{-10}$	$4,11 \times 10^{-17}$

(a) Considerou-se uma população de 14 milhões de habitantes.

Tabela 4.15 Riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide, resultantes das distribuições populacionais POP1 a POP9. (Hipóteses: termo-fonte do ABP e condições meteorológicas MET4)

Distribuição.	Risco Social (n° esperado de nódulos na tireóide / ano)	Risco Individual (a) (n° esperado de nódulos na tireóide/pessoa.ano)
POP1	$1,59 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-11}$
POP2	$1,45 \times 10^{-6}$	$1,04 \times 10^{-12}$
POP3	$1,52 \times 10^{-6}$	$1,09 \times 10^{-12}$
POP4	$1,79 \times 10^{-6}$	$1,28 \times 10^{-13}$
POP5	$5,16 \times 10^{-7}$	$3,69 \times 10^{-14}$
POP6	$1,37 \times 10^{-7}$	$9,79 \times 10^{-15}$
POP7	$3,87 \times 10^{-8}$	$2,76 \times 10^{-15}$
POP8	$3,53 \times 10^{-9}$	$2,52 \times 10^{-16}$
POP9	$2,91 \times 10^{-9}$	$2,08 \times 10^{-16}$

(a) Considerou-se uma população de 14 milhões de habitantes.

4.6.4 Comparação Entre Acidentes Ocorridos no Sítio do IPEN e Numa Área Rural

Realizou-se uma comparação entre as consequências resultantes de acidentes

postulados para o reator de referência IEA-R1, onde foram consideradas duas situações distintas:

- Reator localizado no sítio do IPEN, próximo a um grande centro populacional (ver Tabela 3.6);
- Reator localizado numa área com características demográficas representativas de uma região rural do estado de São Paulo (ver Tabela 3.7).

Para as duas situações, foi considerado o cenário composto pelo termo-fonte do ABP, com as condições meteorológicas correspondentes ao experimento MET4, a exemplo da análise realizada com o reator BR3.

O ABP foi o mais severo dentre os acidentes postulados na análise, resultando na maior liberação de radionuclídeos para o meio ambiente. Do ponto de vista meteorológico, observou-se que as consequências mais severas resultaram, na sua maioria, quando da ocorrência de precipitação no instante correspondente ao início do acidente e durante todo o transcorrer do mesmo, daí a consideração do experimento MET4.

- Mortes Imediatas

Para o cenário proposto nas duas situações, não foi observada a ocorrência de mortes devidas a exposição imediata. Desse modo, o risco de mortes imediatas, resultante das duas situações, é zero.

- Mortes Devidas a Câncer Latente

Na Tabela 4.16 são apresentados os valores médios e máximos do número de mortes devidas a câncer latente, condicionais ao termo-fonte do ABP.

Observou-se que os valores médios e máximos do número de mortes devidas a câncer latente foram maiores para o acidente postulado no sítio do IPEN, segundo fatores aproximados de 422 e 457, respectivamente. Isto pode ser explicado uma vez

Tabela 4.16 Valores médios e máximos para o número de mortes devidas a câncer latente, resultantes dos acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural, condicionais ao termo-fonte do ABP. (Hipóteses: distribuição populacional POP1, termo-fonte do ABP e condição meteorológica MET4).

Localização do Sítio do Reator	Mortes Devidas a Câncer Latente	
	Média	Máximo
Sítio IPEN	13,9	15,3
Área Rural	$3,29 \times 10^{-2}$	$3,35 \times 10^{-2}$

que, conforme observado na referência /52/, a previsão deste tipo de consequência é feita com base nas doses coletivas, sendo a população afetada um parâmetro muito significativo para este cálculo. Na situação analisada, as doses coletivas para cada órgão, resultantes do acidente postulado para o sítio do IPEN, foram maiores que as resultantes do acidente postulado para a área rural, o que explica o fato de que as mortes devidas a câncer latente tenham ocorrido em maior número na primeira situação.

Considerando-se a frequência anual de ocorrência do ABP, que é $2,1 \times 10^{-6}$, e os valores médios do número de mortes devidas a câncer latente, foram calculados os riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente resultantes das duas situações, que são apresentados na Tabela 4.17.

Nas duas situações considerou-se a população existente na área com 75 km de raio, que para o sítio do IPEN totaliza cerca de 14 milhões de habitantes enquanto que para a área rural é de cerca de 3,5 milhões de habitantes.

Observou-se que tanto o risco social quanto o risco individual de mortes devidas a câncer latente são maiores quando da consideração do acidente no sítio do IPEN em comparação ao reator localizado na área rural, segundo fatores de aproximadamente 422 e 106, respectivamente.

Tabela 4.17 Riscos sociais e individuais de mortes devidas a câncer latente, resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural. (Hipóteses: termo-fonte do ABP, condições meteorológicas MET4 e distribuição populacional POP1)

Localização do Sítio do Reator	Risco Social (n° esperado de mortes devidas a câncer latente / ano)	Risco Individual (n° esperado de mortes devidas a câncer latente / pessoa.ano)
Sítio IPEN	$2,92 \times 10^{-5}$	$2,09 \times 10^{-12}$
Área Rural	$6,91 \times 10^{-8}$	$1,97 \times 10^{-14}$

É novamente oportuno observar que, segundo o RSS /5/, a maior parte das mortes devidas a câncer latente resultantes são esperadas de 10 a 40 anos após a ocorrência do acidente.

- Nódulos na Tireóide

Na Tabela 4.18 são apresentados os valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, resultantes das duas situações, condicionais ao termo-fonte do ABP.

Tabela 4.18 Valores médios e máximos para o número de indivíduos que desenvolvem nódulos na tireóide, resultantes dos acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural, condicionais ao termo-fonte do ABP. (Hipóteses: distribuição populacional POP1, termo-fonte do ABP e condição meteorológica MET4).

Localização do Sítio do Reator	Nódulos na Tireóide	
	Média	Máximo
Sítio IPEN	75,9	83,5
Área Rural	$1,79 \times 10^{-1}$	$1,82 \times 10^{-1}$

As maiores ocorrências de nódulos na tireóide foram observadas para o acidente postulado no sítio do IPEN, onde o valor máximo seria de 83,5 nódulos. De

acordo com o RSS /5/, espera-se que aproximadamente 40% dos nódulos observados sejam cancerígenos, dos quais 10% seriam letais. Assim sendo, ocorreriam no máximo 3,34 mortes devidas a câncer na tireóide.

Na Tabela 4.19 são apresentados os riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide resultantes do ABP, para as duas situações quanto à localização do reator.

Tabela 4.19 Riscos sociais e individuais de nódulos na tireóide resultantes de acidentes com o reator localizado no sítio do IPEN e numa área rural. (Hipóteses: distribuição populacional POP1, termo-fonte do ABP e condições meteorológicas MET4)

Localização do Sítio do Reator	Risco Social (n° esperado de nódulos na tireóide / ano)	Risco Individual (n° esperado de nódulos na tireóide/pessoa.ano)
Sítio IPEN	$1,59 \times 10^{-6}$	$1,14 \times 10^{-11}$ (a)
Área Rural	$3,76 \times 10^{-7}$	$1,07 \times 10^{-13}$ (b)

(a) Considerou-se uma população de 14 milhões de habitantes.

(b) Considerou-se uma população de 3,5 milhões de habitantes.

Observou-se que tanto o risco social quanto o risco individual de nódulos na tireóide são maiores quando da consideração do acidente no sítio do IPEN em comparação ao reator localizado na área rural, segundo fatores de aproximadamente 423 e 107, respectivamente.

A exemplo das mortes devidas a câncer latente, é importante observar que, segundo o RSS /5/, os nódulos na tireóide são esperados de 10 a 40 anos após a ocorrência do acidente.

- Acréscimo na Taxa de Incidência de Câncer

Para o acidente postulado no sítio do IPEN, ocorreriam, no máximo, 19 mortes devidas a câncer latente, incluindo as mortes devidas a câncer na tireóide.

Como o valor máximo do número de mortes devidas a câncer latente é esperado ocorrer numa direção predominante, considerou-se a população exposta do setor onde foi observado o valor máximo, que, para o acidente postulado no sítio do IPEN, é cerca de 1,1 milhões de habitantes.

O código CRAC2 considera, no cálculo dos riscos de mortes devidas a câncer latente (exceto leucemia), um período de *plateau* equivalente ao tempo de vida restante do indivíduo. Para efeito de análise, a exemplo do RSS /5/, considerou-se que as mortes devidas a câncer latente (incluindo leucemia) ocorreriam num período de 30 anos. Sendo assim, ter-se-ia que a taxa de incidência de mortes devidas a câncer latente, resultantes do acidente, seria da ordem de aproximadamente 6 mortes por 10 milhões de pessoas por ano, a qual representa uma taxa significativamente menor que a taxa anual de incidência de mortes devidas a todos os tipos de câncer nos Estados Unidos, que, segundo Sprung /53/, é de 18.000 mortes por 10 milhões de pessoas e, segundo o RSS, é de 17.040 mortes por 10 milhões de pessoas.

A nível de Brasil, de acordo com as estatísticas de mortalidade fornecidas pelo Ministério da Saúde /54/, válidas para o ano de 1985, tem-se que a taxa de incidência de mortes devidas a todos os tipos de câncer é de aproximadamente 5.000 mortes por 10 milhões de pessoas por ano. Desse modo, a taxa resultante do acidente representaria um acréscimo de 0,12% no número de mortes devidas a câncer.

É importante notar que, além das incertezas inerentes aos modelos utilizados na análise, os resultados obtidos refletem as condições meteorológicas empregadas, ou seja, estas condições foram utilizadas de maneira determinística, onde assumiu-se uma probabilidade igual a 1 para a ocorrência de precipitação, com categoria de estabilidade atmosférica D (assumiu-se também que as condições meteorológicas definidas para o instante correspondente ao início do acidente mantêm-se inalteradas durante todo o transcorrer do mesmo). Esta é uma hipótese conservativa, uma vez que normalmente deveriam ter sido utilizados dados meteorológicos horários anuais, onde a precipitação num determinado intervalo de tempo ocorreria segundo uma probabilidade especificada com base em estatísticas

meteorológicas observadas. Desse modo, é de se supor que os resultados obtidos representem valores superestimados.

4.6.5 Observações a Respeito da não Consideração das Doses Crônicas Devidas a Ingestão na Previsão das Mortes Devidas a Câncer Latente

Conforme citado no ítem 2.6.2.3, na previsão dos efeitos latentes na saúde do homem não foram consideradas as doses crônicas devidas a ingestão de radionuclídeos.

Numa análise paralela, realizada para os reatores BR3 e IEA-R1, foram comparadas as conseqüências resultantes considerando-se a ingestão e a não ingestão de alimentos contaminados. Na Tabela 4.20 são apresentados os valores médios do número de mortes devidas a câncer latente para os acidentes considerados nos ítems 3.6.4 e 4.6.4.

Observou-se que a contribuição das doses devidas à ingestão foi insignificante quando da consideração dos reatores localizados na área urbana, enquanto que para os reatores localizados na área rural observou-se uma pequena elevação do número de mortes.

Tabela 4.20 Valores médios para o número de mortes devidas a câncer latente, considerando-se a ingestão e a não ingestão de alimentos contaminados. (Hipóteses: distribuição populacional POP1 (zonas urbana e rural) e condições meteorológicas MET4)

Reator	Termo-Fonte	Localização	Mortes Devidas a Câncer	
			s/ingestão	c/ingestão
BR3	SST1	Sítio do IPEN	424	424
		Área Rural	1,13	1,48
IEA-R1	ABP	Sítio do IPEN	13,9	13,9
		Área Rural	$3,29 \times 10^{-2}$	$3,61 \times 10^{-2}$

Capítulo 5

Conclusões e Recomendações

Nos Capítulos 3 e 4 foram apresentados os resultados das análises de conseqüências baseados nos reatores de referência BR3 e IEA-R1, respectivamente. Nestas análises, estudou-se a influência exercida por parâmetros tais como o termo-fonte, condições meteorológicas (precipitação pluviométrica e categoria de estabilidade atmosférica) e distribuição populacional nos resultados. Analisou-se também a influência exercida pela localização do reator, ou seja, foram analisadas duas situações distintas:

- Reator localizado próximo a um grande centro populacional;
- Reator localizado numa área com características demográficas representativas de uma região rural.

Na presente análise foram postulados 15 cenários de distribuições populacionais (POP1 a POP9 e D1 a D6); 12 cenários de condições meteorológicas (MET1 a MET12) e 11 cenários de acidentes (SST1 a SST5 e SST1-50% a SST1-1% para o reator BR3; ABP e ABER para o reator IEA-R1).

As combinações entre estes cenários contituiram-se nos diversos casos que foram analisados, perfazendo um total de:

- 35 casos para o reator BR3;
- 22 casos para o reator IEA-R1.

5.1 Conclusões Gerais

- 1) A ocorrência de mortes devidas a exposição imediata e de efeitos latentes (mortes devidas a câncer e nódulos na tireóide) é fortemente sensível à magnitude do termo-fonte. Isto se explica, uma vez que estas conseqüências são previstas, principalmente, em função da quantidade de radioatividade liberada para o meio ambiente (via atmosfera). A ocorrência dos termos-fonte,

os quais dependem do grau dos danos causados ao núcleo do reator, pode gerar liberações de radioatividade com magnitudes variadas, resultando em doses individuais e coletivas.

No presente estudo, observou-se que para um reator do tipo do BR3, com nível de potência em torno de 50 MWt, somente o termo-fonte SST1 resultaria em doses com intensidade suficiente para causar mortes imediatas. Constatou-se também, que reduções de 50% a 1% no termo-fonte SST1 não resultariam em mortes imediatas. Já no caso do reator IEA-R1, mesmo com o termo-fonte do pior acidente postulado para este reator, que é representado por um LOCA, não seria produzida uma liberação com intensidade suficiente para resultar em mortes imediatas.

- 2) Os resultados obtidos são sensíveis às condições meteorológicas existentes no momento do acidente. Em particular, a ocorrência de precipitação no momento da liberação contribuiu para um aumento significativo do risco de mortes imediatas.

Logo, fica evidente que o conhecimento da climatologia local é essencial para uma análise mais realista. Infelizmente, a nível de Brasil, não existem estatísticas climatológicas refinadas. Ao contrário de diversos países do Primeiro Mundo, existem poucas estações meteorológicas distribuídas pelo território nacional, dificultando, assim, a utilização de dados climatológicos representativos de uma região específica.

- 3) A ocorrência de mortes devidas a exposição imediata e de efeitos latentes (mortes devidas a câncer e nódulos na tireóide), como era de se esperar, é fortemente sensível às variações nas distribuições populacionais.

Ficou evidente que os riscos associados variam de acordo com a densidade populacional da área considerada e com as distâncias dos vários centros populacionais ao reator. Prova disso, é que as consequências mais severas foram observadas para a situação que considerou o reator localizado próximo a

um grande centro populacional (São Paulo, no caso).

- 4) O risco (social e individual) de mortes devidas a câncer latente seria, de maneira geral, pouco afetado por restrições à existência de população residente em áreas próximas ao sítio, uma vez que este tipo de consequência pode ser induzida por baixas doses de radiação, já que elas podem ocorrer a grandes distâncias do reator (dezenas de quilômetros).

- 5) Com base nos resultados obtidos para os piores cenários postulados, ficou evidente a inviabilidade de se propor que um reator do tipo do BR3, com um nível de potência em torno de 50 MWt, seja localizado próximo a uma área com grande densidade populacional, como no caso do sítio do IPEN. Por outro lado, se o reator fosse localizado numa região rural, com baixa densidade populacional, os riscos associados seriam bem menores, sendo que se as áreas mais próximas ao reator fossem quase que totalmente desabitadas, os riscos seriam ainda mais reduzidos. Já para um reator do tipo do IEA-R1, que possui um nível de potência de 5MWt, não haveria restrições quanto a sua localização, considerando-se, principalmente, que o risco de mortes imediatas, resultantes de todos os cenários postulados para este reator, é nulo.

5.2 Reator BR3

- 1) Os termos-fonte correspondentes às situações acidentais SST1, SST2 e SST3 não levam em consideração vários processos de remoção de radionuclídeos, tais como a aglomeração e deposição de radionuclídeos e a dissolução de materiais solúveis em água, os quais podem operar eficientemente dentro do sistema de refrigeração primário e da contenção. Desse modo é de se supor que os resultados obtidos na análise, considerando estes termos-fonte, representem valores superestimados.

É importante observar que no presente trabalho considerou-se que as condições acidentais configuradas por SST1, SST2 e SST3 são realmente

possíveis de ocorrer em um reator do nível de potência do BR3. Isto somente pode ser verificado por meio de códigos específicos, tais como os que compoem o STCP /30/.

- 2) Somente as situações que envolveram acidentes no reator BR3, considerando-se o termo-fonte SST1 e a ocorrência de precipitação no momento da liberação, resultaram em risco de mortes imediatas, tanto para o reator localizado próximo a um grande centro populacional quanto para o reator localizado numa área com características demográficas representativas de uma região rural.

Em ambas as situações, a ocorrência de mortes imediatas restringiu-se à distância de 1,5 km do reator (equivale ao raio do intervalo espacial 1, no modelo utilizado).

Segundo a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) /61/, medidas de emergência que visem a redução das exposições resultantes de acidentes devem ser tomadas com base nos níveis de intervenção, que são expressos em termos de dose equivalente. No caso da evacuação de área, a CNEN /61/ recomenda que esta medida seja adotada somente quando as doses projetadas tenham possibilidade de exceder 500 mSv para o corpo inteiro ou 5.000 mSv (5 Sv) para um órgão isolado.

Na análise, observou-se que doses superiores a 500 mSv para corpo inteiro seriam previstas somente para distâncias de até 2.200 metros aproximadamente, considerando-se o cenário com termo-fonte SST1 e com ocorrência de precipitação no momento da liberação. Dessa forma, esta distância será importante no caso em que se pretenda adotar medidas de evacuação, o que contribuiria para a redução do risco de mortes imediatas para os indivíduos do público.

- 3) Os riscos individuais de mortes imediatas resultantes dos acidentes que representaram as piores situações postuladas para o reator BR3 (SST1, MET4 e POPI (zona urbana e zona rural)) foram da ordem de 8×10^{-7} mortes imediatas/
-

pessoa.ano. Este valor é inferior ao risco individual de mortes imediatas resultante de acidentes não nucleares ocorridos, por exemplo, nos Estados Unidos, que é de 6×10^{-4} mortes imediatas/pessoa.ano /5/. Em termos de comparação, pode-se afirmar que o risco individual de mortes imediatas resultante destes cenários são da mesma ordem de grandeza dos riscos individuais de mortes imediatas resultantes de raios, tornados e furacões, segundo estatísticas norte-americanas.

- 4) O maior número de mortes devidas a câncer, resultantes dos piores cenários postulados para o reator BR3 (SST1, MET4 e POP1), considerando-se a população da zona urbana e da área rural, representaria um acréscimo de 3,8% e de 0,024%, respectivamente, na taxa de incidência de mortes devidas a câncer espontâneo no Brasil, a qual, segundo as estatísticas de mortalidade fornecidas pelo Ministério da Saúde /54/, válidas para o ano de 1985, é de aproximadamente 500 mortes por milhão de pessoas por ano.

5.3 Reator IEA-R1

- 1) Todos os cenários postulados para o reator IEA-R1 resultaram em risco de mortes imediatas igual a zero. Isto se explica, uma vez que as liberações de radionuclídeos produzidas pelos acidentes postulados para este reator resultaram em doses imediatas inferiores ao limiar de dose para a ocorrência deste tipo de efeito.

Considerando-se o pior cenário postulado para o reator IEA-R1 (termo-fonte do ABP e ocorrência de precipitação no momento da liberação), observou-se que para o ambiente externo à instalação não seriam previstas doses superiores a 500 mSv para o corpo inteiro. Desse modo, de acordo com as recomendações da CNEN /61/, não haveria a necessidade da adoção de medidas de evacuação de área.

- 2) O maior número de mortes devidas a câncer, resultantes do pior cenário postulado para o reator IEA-R1 (termo-fonte do ABP e ocorrência de
-

precipitação no momento da liberação), considerando-se a população da zona urbana e da área rural, representaria um acréscimo de 0,12% e de 0,0006%, respectivamente, na taxa anual de incidência de mortes devidas a câncer espontâneo no Brasil.

5.4 Recomendações

Como sugestão para futuros trabalhos sobre conseqüências resultantes de acidentes em reatores de pesquisa e sítio específicos, recomenda-se:

- 1) Utilizar termos-fonte obtidos de análises de acidentes realizadas para um reator específico. Estas análises devem fornecer as freqüências de ocorrência e os termos-fonte associados a acidentes postulados para o reator em questão. Devem ser postulados cenários de acidentes condizentes com as características de projeto de um reator específico. Os termos-fonte poderiam ser calculados pelos códigos que constituem o STCP /30/ ou por códigos equivalentes, como, por exemplo, o MELCOR /31/. Eventualmente, pode haver a necessidade de se realizar modificações nestes códigos, de maneira a adaptá-los a reatores de baixa potência.
 - 2) Utilizar modelos matemáticos para o cálculo dos efeitos na saúde do homem que sejam baseados em técnicas revisadas com relação aos modelos empregados no RSS;
 - 3) Considerar medidas de emergência, tais como um esquema definido de evacuação de área, abrigagem e relocação.
-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ RITCHIE, L. T.; ALPERT, D. J.; BURKE, R. P.; OSTMEYER, R. M.. *Probabilistic risk assessment course documentation, volume 7: environmental transport and consequence analysis*. Albuquerque, NM, Sandia National Labs., Aug. 1985. (NUREG/CR-4350/7).
 - /2/ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Theoretical possibilities and consequences of major accidents in large nuclear power plants*. Washington, DC, Mar. 1957. (WASH-740).
 - /3/ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Reactor site criteria. In: CODE of Federal Regulations-Energy, Apr. 12, 1962. (10 CFR Part 100). Washington, DC, U. S. Government Printing Office, 1990.
 - /4/ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Probabilistic safety assessment for research reactors*. Vienna, Dec. 1986. (IAEA-TECDOC-400).
 - /5/ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Reactor Safety Study - An assessment of accident risks in U. S. commercial nuclear power plants*. Washington, DC, Oct. 1975. (WASH-1400, NUREG-75/014).
 - /6/ PASNY. *Indian Point nuclear power units 1, 2 and 3 probabilistic safety study*. New York, 1982. (Dockets 50-3, 50-247 and 50-286).
 - /7/ RITCHIE, L. T.; JOHNSON, J. D.; BLOND, R. M.. *Calculations of reactor-accident consequences, version 2*. Albuquerque, NM, Sandia National Labs., Feb. 1983. (NUREG/CR-2326).
 - /8/ RITCHIE, L. T.; ALPERT, D. J.; BURKE, R. P.; JOHNSON, J. D.; OSTMEYER, R. M.; ALDRICH, D. C.; BLOND, R. M.. *CRAC2 model description*. Albuquerque, NM,
-

Sandia National Labs., Mar. 1984. (NUREG/CR-2552).

- /9/ JOW, H. N.; SPRUNG, J. L.; CHANIN, D. I.; HELTON, J. C.; ROLLSTIN, J. A..
Reactor accident consequence analysis code (MACCS). Albuquerque, NM, Sandia
National Labs., 1990. (SAND-P9-1412C).
- /10/ BAYER, A.; BURKART, K.; EHRHARDT, J.; HÜBSCHMANN, W.; SCHÜCKLER, M.; VOGT,
S.. *The German Risk Study: accident consequence model and results of the
study. Nucl. Technol.*, 59:20-50, Oct. 1982.
- /11/ KOLLAS, J. G.; SYNODINOU, V.; VARSAMIS, G.; ANTONIADES, J.; CATSAROS, M.. *An
assessment of the individual and social risks of Athens population
resulting from a hypothetical loss-of-coolant release of the Greek Research
Reactor - 1. Athens, Greece, Democritos Nuclear Research Center, Mar. 1984.
(DEMO-84/2).*
- /12/ KOLLAS, J. G.. *An estimation of the LOCA consequences of a research reactor
located within a large population centre. In: Thermal Nuclear Reactor
Safety: proc. of 5th int. meeting, Karlsruhe, Sep. 9-13, 1984. Karlsruhe,
Nuclear Research Center Karlsruhe, Dec. 1984. p.2048-2056. (KFK-3880/3).*
- /13/ KOLLAS J. G. & ANOUSSIS, J N.. *An assessment of the consequences of a
research reactor credible accident release. In: Austrian Association for
Radiation Protection. IRPA: proc. of IV European Congress - XIIIth Regional
Congress, Salzburg, Austria, Sep. 15-19, 1986. Vienna, Nov. 1988.
p.162-166. (OEVS-Mitteilung-1988).*
- /14/ RASMUSSEN, C. E. & IDE, K.. *Radiological consequences of a postulated cooling
channel blockage incident at a pool-type research reactor. In:
International Atomic Energy Agency. Research Safety, Operations and
Modifications: proc. int. symp., Chalk River, Ontario, Oct. 23-27, 1989.
Chalk River, Ontario, Chalk River Nuclear Labs., Mar. 1990. v.2, p.300-308.
(AECL-9926(v.2)).*
-

- /15/ DI NUNNO, J. J.; ANDERSON, F. D.; BAKER, R. E.; WATERFIELD, R. L..
Calculation of distance factors for power and test reactor sites.
Washington, DC, U. S. Atomic Energy Commission, Mar. 1962. (TID-14.844).
- /16/ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Assumptions used for evaluating the potential consequences of a loss of coolant accident for pressurized water reactors.* Jun. 1974. (Regulatory Guide 1.4, Rev.2).
- /17/ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Regulatory impact of nuclear reactor accident source term assumptions.* Washington, DC, Jun. 1981. (NUREG-0771).
- /18/ BLOND, R. & TAYLOR, M.. *Development of severe- reactor-accident source terms: 1957-1981.* Washington, DC, U. S. Nuclear Regulatory Commission, Nov. 1982. (NUREG-0773).
- /19/ BINFORD, F. T.. *The Oak Ridge Research Reactor: safety analysis.* Oak Ridge, TN, Oak Ridge National Lab., Mar. 1968. (ORNL-4169).
- /20/ WILLIAMS, H. T.; LILY, A. R.; STOPINSKI, O. W.; WARNER, C. L.; YARNELL, J. L.; MAINE, H. L.. *1969 status report on the Omega West Reactor, with revised safety analysis.* Los Alamos, NM, Los Alamos Scientific Lab., May 1969. (LA-4192).
- /21/ WEBSTER, C. C.. *Water-loss tests in water cooled and moderated research reactors.* *Nucl. Saf.*, 8 (6):590-596. Nov.-Dec. 1967.
- /22/ GROFF, A. G.. *ORIGEN2 - A revised and updated version of the Oak Ridge isotope generation and depletion code.* Oak Ridge, TN, Oak Ridge National Lab., Jul. 1980. (ORNL-5621).
- /23/ WILSON, W. B.; ENGLAND, T. R.; LABAUVE, R. J.; BATTI, M. E.; WESSOL, D. E.; PERRY, R. T.. *Status of CINDER and ENDF/B-V based libraries for*
-

transmutation calculations. In: *WASTE Transmutation: proc. conf., Austin, TX, Jul. 22-24, 1980. Mar. 1981. p.673.*

/24/ PHILADELPHIA ELECTRIC COMPANY. *Probabilistic risk assessment - Limerick Generating Station. Philadelphia, Pennsylvania, 1981. (USNRC Dockets 50-352 and 50-353).*

/25/ COMMONWEALTH EDISON COMPANY. *Zion probabilistic safety study. Chicago, 1981.*

/26/ LEVENSON, M. & Rahn, F.. *Realistic estimates of the consequences of nuclear accidents. Nucl. Technol., 53:99-110, May 1981.*

/27/ GIESEKE, J. A.. *Radionuclide release under specific LWR accident conditions. Columbus, OH, Battelle Columbus Labs., 1985. (BMI-2.104).*

/28/ NUCLEAR ENERGY AGENCY. *Nuclear reactor accident source terms. Paris, OECD, Mar. 1986.*

/29/ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Technical bases for estimating fission product behaviour during LWR accidents. Washington, DC, Jun. 1981. (NUREG-0772).*

/30/ GIESEKE, J. A.; CYBULSKIS, P.; JORDAN, H.; LEE, K. W.; SCHUMACHER, P. M.; CURTIS, L. A.; WOOTON, R. O.; QUAYLE, S. F.; KOGAN, V.. *Source Term Code Package. Columbus, OH, Battelle's Columbus Division, Jul. 1986. (NUREG/CR-4587).*

/31/ SUMMERS, R. M.. *MELCOR 1.8.0: A computer code for nuclear severe accident source term and risk assessment analysis. Albuquerque, NM, Sandia National Labs., 1991. (NUREG/CR-5531).*

/32/ PLYS, M. G., THOMAS, W. A. ; ELICSON, G. T.. *IPE uses of MAAP 3.0B. Trans. Am. Nucl. Soc., 59:229-230. 1989.*

- /33/ SPRUNG, J. L.. *An investigation of the adequacy of the composite population distributions used in the Reactor Safety Study.* Albuquerque, NM, Sandia National Labs., 1978. (SAND78-0556).
- /34/ TURNER, D. B.. *Workbook of atmospheric dispersion estimates.* Cincinnati, OH, U. S. Department of Health, Education and Welfare, Air Resources Field Research Office, 1969.
- /35/ EIMUTIS, E. C. & KONICEK, M. G.. *Derivations of continuous functions for the lateral and vertical atmospheric dispersion coefficients.* *Atmos. Environ.*, 6:859-863. 1972.
- /36/ STULL, R. B.. *An introduction to boundary layer meteorology.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988.
- /37/ ALDRICH, D. C.; SPRUNG, J. L.; ALPERT, P. J.; DIEGERT, K.; OSTMEYER, R. M.; RITCHIE, L. T.; STRIP, D. P.. *Technical guidance for siting criteria development.* Albuquerque, NM, Sandia National Labs., Dec. 1982. (NUREG/CR-2239).
- /38/ SLADE, D. H.. *Meteorology and atomic energy 1968.* U. S. Atomic Energy Commission, Jul. 1968. (TID-24190).
- /39/ MALETSKOS, C. J.; COOPER, D. W.; EVANS, J. S.; JACOB, N.; KASE, K. R.; ROBERTSON, J. B.; SMITH, D.G.. *Critical review of the Reactor-Safety study radiological health effects model.* Albuquerque, NM, Sandia National Labs., Mar. 1983. (NUREG/CR-3185).
- /40/ KOCHER, D. C.. *Sensitivity and uncertainty studies of the CRAC2 computer code.* Oak Ridge, TN, Oak Ridge National Lab., May 1985. (NUREG/CR-4038).
- /41/ EVANS, J. S.. *Health effects models for nuclear power plant accidents*
-

consequence analysis, Part I, introduction, integration and summary, Rev. I. Albuquerque, NM, Sandia National Labs., 1989. (NUREG/CR-4214).

/42/ Power reactors 1983, section 1 - general information. *Nucl. Eng. Int.*, 28(344 suppl.):10, 46-47, Aug. 1983.

/43/ JAPAN NUCLEAR-ENERGY INFORMATION CENTER. *Directory of nuclear power plants in the world 1985*. Tokyo, 1985.

/44/ MOTTE, F. & HAAS, D.. *Combined utilization of BR3 and BR2 reactors for ramping and cycling tests of high burnup fuel rods: Proceedings of a technical committee meeting, held in Lyon, France, 18-21 May 1987*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 1988. p.57-64 (IWGFPT/28).

/45/ BELL, M. J.. *ORIGEN, the ORNL isotope generation and depletion code*. Oak Ridge, TN, Oak Ridge National Lab., 1973. (ORNL-4628).

/46/ MINSART, G.. *Overview of belgian activities in the frame of improved fuel utilization and high conversion reactors: Technical committee on technical and economic aspects of high converters, Nuremberg, FRG, 26-29 March 1990*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 1990.

/47/ COORDENADORIA PARA PROJETOS ESPECIAIS. *Relatório de Análise de Segurança do reator IPEN-MB-01*. São Paulo, 1988.

/48/ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Preparation of environmental reports for nuclear power stations*. Jul. 1976. (Regulatory Guide 4.2, Rev.2).

/49/ FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Sinopse preliminar do censo demográfico - IX recenseamento geral do Brasil - 1980*. Rio de Janeiro, 1981.

/50/ PONTING, A. C., & NAIR, S.. *A comparison of alternative methods of*

calculating complementary cumulative distribution functions of health effects following an atmospheric radioactive release. Berkeley, Central Electricity Generating Board, Apr.1984. (CEGB-TPRD-/B-0441/N84).

/51/ UFRJ. COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA. *Análise probabilística de segurança de centrais nucleares: curso realizado no Rio de Janeiro, 21-30 de Jun. 1982.* Rio de Janeiro, Furnas Centrais Elétricas, 1982.

/52/ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Overview of the Reactor Safety Study consequence model.* Washington, DC, Jun. 1977. (NUREG-0340).

/53/ SPRUNG, J. L.. *Ex-plant consequence analysis: models, typical results, uncertainties, chemistry.* Albuquerque, NM, Sandia National Labs., 1986. (SAND86-2166C).

/54/ MINISTÉRIO DA SAÚDE. *Estatísticas de mortalidade - Brasil, 1985.* Brasília, 1988.

/55/ MAIORINO, J. R.. *Reatores de pesquisa.* São Paulo, IPEN, 1987. (Apostila do curso latino americano sobre os benefícios da energia nuclear, Rio de Janeiro, Jul. 1987).

/56/ YAMAGUSHI, M.. Comunicação pessoal.

/57/ KOLLAS, J. G. & ANOUSSIS, J. N.. *A comparison of the consequences of the design basis accident of the Greek Research Reactor with those of a serious realistic accident.* Athens, Greece, Democritos Nuclear Research Center, Dec. 1985. (DEMO-85/12).

/58/ ALLEN, F. R.. Application of probabilistic analysis techniques to a typical 10 MW MTR. In: *INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Safety and licensing guidebook: research reactor core conversion from the use of highly enriched*

uranium to the use of low enriched uranium fuels. Vienna, 1990. v.2,
ap, endix B-3.

/59/ BARTZIS, J. G.. *Whole core analysis of an open pool research reactor under
the most severe loss of coolant accident conditions.* Athens, Greece,
Democritos Nuclear Research Center, Jun. 1984. (DEMO-84/3).

/60/ BAGGENTOS. *Sicherheitsbericht für 20 MW des Forschungsreaktors 'SAPHIR'.*
Würenlingen, Dez. 1980. (TM-533-80-3).

/61/ COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Planejamento para registro de
atendimento a emergências radiológicas ou acidentes nucleares.* Rio de
Janeiro, 1991. (Relatório interno).
