



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE RADIONUCLÍDEOS E CÁLCULO DE DOSE  
DEVIDO À QUEDA DE EMBALADOS DE BAIXO E MÉDIO NÍVEL DE  
RADIAÇÃO

Juliana Pacheco Duarte

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Nuclear da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Paulo Fernando F. Frutuoso e Melo

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2013

DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE RADIONUCLÍDEOS E CÁLCULO DE DOSE  
DEVIDO À QUEDA DE EMBALADOS DE BAIXO E MÉDIO NÍVEL DE  
RADIAÇÃO

Juliana Pacheco Duarte

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO  
CURSO DE ENGENHARIA NUCLEAR DA ESCOLA POLITÉCNICA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
ENGENHEIRO NUCLEAR.

Examinada por:

---

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

---

Prof. José de Jesús Rivero Oliva

---

Dr. Marco Antonio Bayout Alvarenga

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO de 2013

Duarte, Juliana Pacheco

Dispersão Atmosférica de Radionuclídeos e Cálculo de Dose devido à Queda de Embalados de Baixo e Médio Nível de Radiação/ Juliana Pacheco Duarte. – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2013.

XII, 52 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Projeto de Graduação – UFRJ/POLI/ Engenharia Nuclear, 2013.

Referencias Bibliográficas: p. 35-37.

1. Dispersão Atmosférica. 2. Rejeito radioativo de baixo e médio nível de radiação. 3. Modelo de Pasquill-Gifford. 4. Fluidodinâmica Computacional. I. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Nuclear. III. Dispersão Atmosférica de Radionuclídeos e Cálculo de Dose devido à Queda de Embalados de Baixo e Médio Nível de Radiação.

*Aos meus pais e a minha irmã*

## *Agradecimentos*

Aos meus pais e minha irmã pelo apoio incondicional.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Nuclear da UFRJ, pelo apoio, paciência e tudo que me ensinaram.

À Eletrobrás Termonuclear S.A., em nome dos Engenheiros Antônio Sérgio Alves, Erivaldo Passos e Wilson Dias, da Superintendência de Gerência de Combustível e Segurança Nuclear, que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho com as informações necessárias e valiosas discussões.

Ao meu orientador, prof. Paulo Fernando, pelo apoio e incentivo em todas as horas.

A Deus por tudo.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Nuclear.

## DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE RADIONUCLÍDEOS E CÁLCULO DE DOSE DEVIDO À QUEDA DE EMBALADOS DE BAIXO E MÉDIO NÍVEL DE RADIAÇÃO

Juliana Pacheco Duarte

Fevereiro/2013

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Curso: Engenharia Nuclear

Atualmente, o Prédio de Monitoração do Centro de Gerenciamento de Rejeitos da Central Nuclear de Almirante Álvaro Alberto, Angra dos Reis, RJ, encontra-se em processo de licenciamento. Um dos acidentes postulados neste prédio é a queda de um embalado contendo rejeito de baixo e médio nível de radiação proveniente da operação das usinas nucleares Angra 1, 2 e, futuramente, Angra 3. A queda do embalado pode levar à liberação de material radioativo, que entraria em suspensão e ocasionaria a formação de uma nuvem radioativa nas vizinhanças da central nuclear, por falha no desligamento do sistema de ventilação. Para avaliar este cenário, foram feitas uma avaliação dos dados meteorológicos da região e um levantamento do termo fonte para quatro diferentes tipos de embalados. A dispersão atmosférica foi calculada pelo modelo gaussiano, utilizando os coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford e pelo uso da fluidodinâmica computacional (CFD). O modelo utilizando a CFD foi realizado através do software ANSYS CFX<sup>TM</sup> 14.0 e considerou aspectos da topografia da região que não foram considerados no modelo gaussiano. A dose no indivíduo do público foi calculada para seis grupos etários seguindo as recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica e da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). A maior dose encontrada foi para crianças de 7 a 12 anos no ponto mais próximo da liberação e foi igual a 0,11 mSv no pior cenário de estabilidade atmosférica e velocidade de vento. Este valor representa menos que 0,05% da dose estipulada pela CNEN para zona de exclusão em caso de acidentes com reatores nucleares de potência.

*Palavras-chave:* Rejeito radioativo, Baixo nível de radiação, Médio nível de radiação, Dose, Modelo de Pasquill-Gifford, Fluidodinâmica Computacional.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Nuclear Engineer.

ATMOSPHERIC DISPERSION AND DOSE EVALUATION DUE TO PACKAGE  
DROP CONTAINING LOW AND INTERMEDIATE LEVEL WASTE

Juliana Pacheco Duarte

February/2013

Advisor: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Course: Nuclear Engineering

The Building Monitoring of the Waste Management Center of Almirante Álvaro Alberto Nuclear Power Plant, in Angra dos Reis, RJ, is currently under licensing. One of the postulated accidents in this building is the drop of a package containing low and intermediate level waste derived from operation of nuclear power plants Angra 1, 2, and in the near future, Angra 3. The package drop can lead to the release of radioactive material, which comes into suspension and forms a radioactive cloud in the vicinity of the nuclear power plant, due to the shutdown failure of the ventilation system. To evaluate this scenario, an assessment of meteorological data and of the source term for four different types of packaging were made. The atmospheric dispersion was evaluated by the Gaussian model, using the Pasquill-Gifford dispersion coefficients, and by the use of Computational Fluid Dynamics (CFD). The model using the CFD was performed through the ANSYS CFX<sup>TM</sup> 14.0 software considering topography aspects, which were not considered in the Gaussian model. The dose for the public was calculated for six age groups following the International Atomic Energy Agency and the National Nuclear Energy Commission (CNEN) recommendations. The highest dose was found for children 7-12 years old at the closest point of release and it was equal to 0.11 mSv in the worst scenario of atmospheric stability and wind speed. This represents less than 0.05% of the dose recommended by the regulatory body (CNEN) for the exclusion zone in the case of nuclear power reactor accidents.

*Keywords:* Radioactive waste, Low Level Waste, Intermediate Level Waste, Dose, Pasquill-Gifford model, Computational Fluid Dynamics.

# Sumário

Capítulo 1	Introdução .....	1
Capítulo 2	Revisão Bibliográfica .....	3
Capítulo 3	Características do sítio .....	7
3.1	Descrição do cenário .....	7
3.2	Perfil de velocidade do vento e estabilidade da região .....	8
3.3	Descrição dos embalados .....	15
Capítulo 4	Dispersão atmosférica .....	17
4.1	Considerações gerais .....	17
4.2	Modelo gaussiano (ou de Pasquill-Gifford) .....	18
4.3	Fluidodinâmica Computacional .....	18
4.3.1	Conceitos básicos do CFX .....	19
4.3.2	Parâmetros utilizados .....	20
Capítulo 5	Cálculo de dose .....	23
Capítulo 6	Resultados .....	25
6.1	Análises de sensibilidade .....	30
Capítulo 7	Conclusões .....	33
Referências	.....	35
Apêndice I	Programa Rosa dos Ventos (em linguagem Fortran 90) .....	38
Apêndice II	Programa Modelo Pasquill-Gifford (Mathematica 7.0) .....	43



# Lista de Figuras

Figura 1	- Imagem de satélite da CNAAA, com ênfase no Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR).....	7
Figura 2	- Prédio de Monitoração do CGR (fora de escala) (ETN, 2010).....	8
Figura 3	- Frequência das classes de estabilidade de Pasquill-Gifford (jan/2000 - dez/2008).....	11
Figura 4	- Frequência das classes de estabilidade de Pasquill-Gifford durante período de calmaria (jan/2000 - dez/2008). ....	12
Figura 5	- Frequência da velocidade do vento para classe de estabilidade D (jan/2000 - dez/2008). ....	12
Figura 6	- Frequência da velocidade do vento para classe de estabilidade E (jan/2000 - dez/2008).....	12
Figura 7	- Frequência da velocidade do vento para classe de estabilidade F (jan/2000 - dez/2008).....	13
Figura 8	- Frequência de direção de vento na classe de estabilidade D (período de jan/2000 - dez/2008). ....	13
Figura 9	- Frequência de direção de vento na classe de estabilidade E (período de jan/2000 - dez/2008). ....	14
Figura 10	- Frequência de direção de vento na classe de estabilidade F (período de jan/2000 - dez/2008). ....	14
Figura 12	- Tambores de 200 litros de (a) Angra 1 e (b) Angra 2 (ETN, 2003). ....	16
Figura 13	- Atividades dos embalados (ETN, 2012,2005a,b; Alves, 2008).....	16
Figura 14	- Etapas do pacote ANSYS <sup>TM</sup> para dinâmica dos fluidos. ....	19
Figura 15	- Domínio da geometria nº 1 (em vermelho) e da geometria nº 2 (em verde) .....	21
Figura 16	- Malhas não-estruturadas para geometria nº 1 (a) e geometria nº 2 (b). ....	21
Figura 17	- Concentração da nuvem radioativa ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) e perfil de velocidade do vento $u$ (m/s) para vento na direção NE. A nuvem se origina no Prédio de Monitoração do CGR e atinge o ponto mais próximo na rodovia. Geometria nº 1 (modelo CFD).....	25
Figura 18	- Concentração da nuvem radioativa ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) e perfil de velocidade do vento para vento na direção NE. A nuvem se origina no Prédio de Monitoração	

	do CGR e atinge o ponto mais próximo na rodovia. Isopletas da concentração estão mostradas (modelo gaussiano).....	25
Figura 19	- Concentração da nuvem radioativa ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) e perfil de velocidade do vento $u$ (m/s) para vento na direção N. A nuvem se origina no Prédio de Monitoração do CGR e atinge o ponto ao norte na rodovia. Geometria nº 2 (modelo CFD). .....	26
Figura 20	- Concentração da nuvem radioativa ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) e perfil de velocidade do vento para vento na direção N. A nuvem se origina no Prédio de Monitoração do CGR e atinge o ponto ao norte na rodovia. Isopletas da concentração estão mostradas (modelo gaussiano). .....	26
Figura 21	- Perfil de velocidade do vento $u$ (m/s) próximo ao Prédio de Monitoração.	27
Figura 22	- Isopletas no plano do ponto mais próximo (650 metros do ponto de liberação), na rodovia (modelo CFD). .....	27
Figura 23	- Isopletas no plano do ponto ao norte (950 metros do ponto de liberação), na rodovia (modelo CFD). .....	28
Figura 24	- Contribuição de cada radionuclídeo no valor final da dose.....	30
Figura 25	- Variação da dose com a velocidade do vento e categoria de estabilidade. Parâmetros fixos: ponto mais próximo (local), queda do embalado RP1 (termo fonte), crianças de 7 a 12 anos (maior dose). .....	31
Figura 26	- Variação da dose com a velocidade do vento e categoria de estabilidade. Parâmetros fixos: ponto ao norte (local), queda do embalado RP1 (termo fonte), crianças de 7 a 12 anos (maior dose). .....	31
Figura 27	- Faixa de dose com fração de radioatividade liberada. Parâmetros fixos: ponto mais próximo (local), queda do embalado RP1 (atividade total), crianças de 7 a 12 anos (maior dose), categoria de estabilidade E e velocidade do vento igual a 1,3 m/s. ....	32
Figura 28	- Variação da concentração no ponto mais próximo com a difusividade cinemática usada no modelo CFD. ....	32

## Lista de Tabelas

Tabela 1	- Classificação de rejeitos sólidos (CNEN, 1985).....	3
Tabela 2	- Rejeitos de baixo e médio nível de radiação produzidos na operação normal da CNAAA (ETN, 2003).....	4
Tabela 3	- Relação dos tipos de turbulência atmosférica com as condições do tempo (Pasquil, 1961, <i>apud</i> Till e Grogan, 2008).....	9
Tabela 4	- Características da torre meteorológica A-10 existente na CNAAA. ....	10
Tabela 5	- Estrutura dos arquivos.....	10
Tabela 6	- Classes de velocidade do vento (período de jan/2000 - dez/2008).....	11
Tabela 7	- Principais parâmetros de entrada no ICEM. ....	22
Tabela 8	- Principais parâmetros de entrada no CFX. ....	22
Tabela 9	- Taxa de inalação - adaptado de Dias, (2002). ....	23
Tabela 10	- Dose (em Sv) no ponto mais próximo (modelo gaussiano). ....	28
Tabela 11	- Dose (em Sv) no ponto mais próximo (modelo CFD). ....	28
Tabela 12	- Dose (em Sv) no ponto ao norte (modelo gaussiano). ....	29
Tabela 13	- Dose (em Sv) no ponto ao norte (modelo CFD). ....	29

# Lista de Siglas

- AIEA** - Agência Internacional de Energia Atômica
- CE** - Concentrado do Evaporador
- CFD** - Fluidodinâmica Computacional (Computational Fluid Dynamics, em inglês)
- CGR** - Centro de Gerenciamento de Rejeitos
- CNAAA** - Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
- CNEN** - Comissão Nacional de Energia Nuclear
- EPA** - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency, em inglês)
- ETN** - Eletrobras Eletronuclear S.A.
- F** - Filtro
- NRC** - Comissão Reguladora Nuclear dos Estados Unidos (United States Nuclear Regulatory Commission, em inglês)
- RANS** - Equações Navier-Stokes médias de Reynolds (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations, em inglês)
- RC** - Rejeito Compactado
- RNC** - Rejeito Não Compactado
- RP** - Resina do Primário
- RP1** - Resina do Primário de Angra 1
- RP2** - Resina do Primário de Angra 2
- RS** - Resina do Secundário
- SAN** - Alto Nível de Radiação
- SBN** - Baixo Nível de Radiação
- SMN** - Médio Nível de Radiação

# ***Capítulo 1 Introdução***

Os rejeitos de baixo e médio nível de radiação produzidos pelas usinas Angra 1 e 2, e futuramente Angra 3 são depositados no Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR), localizado na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), em Angra dos Reis, RJ, Brasil. O CGR consiste em três depósitos capazes de armazenar tambores, *liners* e caixas metálicas, que contenham rejeitos sólidos compactados ou imobilizados em matrizes de cimento ou betume.

"Com o intuito de dotar o complexo dos depósitos de rejeitos de controle mais específico dos embalados e redução do volume estocado, a Eletronuclear decidiu implantar o Prédio de Monitoração, a fim de monitorar e promover a contabilização isotópica de embalados de rejeitos radioativos, bem como criar facilidades que permitam a segregação de rejeitos industriais convencionais contidos nos embalados de compactáveis, reduzindo assim, o volume de embalados estocados. O levantamento do inventário radioisotópico dos embalados de rejeitos (contabilização isotópica) atende aos requisitos básicos de segurança para aceitação de rejeitos radioativos, para fins de deposição, apresentando as evidências de sua conformidade com os limites autorizados" (ETN, 2010). A contabilização isotópica e a segregação destes materiais são de fundamental importância para a deposição final destes rejeitos.

Atualmente, o Prédio de Monitoração do CGR está em processo de licenciamento na Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Um dos acidentes postulados neste prédio é a queda de embalados com liberação de material radioativo pelo sistema de ventilação levando à formação de uma nuvem radioativa. O objetivo deste trabalho é discutir este cenário, calcular a dispersão atmosférica e a dose no indivíduo do público devido à inalação e à imersão na nuvem radioativa.

Uma revisão bibliográfica está apresentada no Capítulo 2, sobre análises de acidentes em instalações que lidam com rejeitos radioativos, modelos de dispersão utilizados na indústria nuclear e química e normas que envolvem especificações técnicas de embalados contendo rejeitos de baixo e médio nível de radiação. No terceiro Capítulo é feita uma descrição do cenário de acidente e são expostas as características do sítio consideradas, tais como estabilidade atmosférica, velocidades do vento e termo fonte.

O próximo Capítulo descreve as abordagens gaussianas e com o uso da fluidodinâmica computacional (CFD) utilizadas para simular a dispersão atmosférica. A simulação numérica foi realizada através do código ANSYS CFX<sup>TM</sup> 14.0, a qual utiliza as equações de Navier-Stokes médias de Reynolds (RANS, em inglês Reynolds Averaged Navier-Stokes) resolvidas pelo método de volumes finitos. É importante ressaltar que para atender à proposta deste trabalho perante a Eletrobrás Termonuclear S.A., o modelo gaussiano é suficiente. Porém, a simulação com CFD foi desenvolvida a fim de avaliar, de maneira geral, como seria uma modelagem mais realista do problema de dispersão atmosférica.

O cálculo da dose é descrito brevemente no Capítulo 5, seguindo as recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA, 2001) e os coeficientes de dose para diferentes faixas etárias recomendados pela CNEN (CNEN, 2005). Os resultados da concentração e doses estão dispostos no Capítulo 6 e as conclusões no Capítulo 7.

## Capítulo 2 Revisão Bibliográfica

De acordo com a norma CNEN-NE-6.05 (CNEN, 1985), rejeito radioativo é definido como qualquer material resultante de atividades humanas, que contenha radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de isenção especificados na Norma CNEN-NE-6.02<sup>1</sup>, e para o qual a reutilização é imprópria ou não prevista.

Os rejeitos sólidos contendo emissores beta e/ou gama, e nos quais os eventuais emissores alfa tenham concentração total inferior a  $3,7 \times 10^8$  Bq/m<sup>3</sup> ( $10^{-2}$  Ci/m<sup>3</sup>), são classificados nas categorias baixo, médio e alto nível de radiação, de acordo com a taxa de exposição na superfície do rejeito especificada na Tabela 1 (CNEN, 1985).

Tabela 1 - Classificação de rejeitos sólidos (CNEN, 1985)

Categoria	Taxa de exposição (X) na superfície	
	$\mu\text{C}/\text{kg}\cdot\text{h}$	R/h
Baixo Nível de Radiação (SBN)	$X \leq 50$	$X \leq 0,2$
Médio Nível de Radiação (SMN)	$50 < X \leq 500$	$0,2 < X \leq 2$
Alto Nível de Radiação (SAN)	$X > 500$	$X > 2$

Os rejeitos sólidos de baixa e média atividade produzidos pela usina nuclear de Angra 1, 2 e, futuramente, Angra 3 são provenientes da operação normal e são constituídos de: resina do primário (RP); rejeito compactado (RC); rejeito não compactado (RNC); concentrado do evaporador (CE); filtro (F) e; resina do secundário (RS) (ETN, 2003). Estes rejeitos são armazenados em embalados específicos como mostrado na Tabela 2.

A classificação destes embalados contendo materiais radioativos está nas normas de transporte AIEA (2012), NRC (1999) e CNEN (1988). Cada tipo de embalado é definido pela sua atividade e taxa de dose dos radionuclídeos presentes e possui diferentes margens de segurança. Para rejeitos de baixo e médio nível de radiação, embalados industriais ou do Tipo A podem ser utilizados e devem seguir uma série de restrições sobre resistência mecânica e térmica descritas em AIEA (2006) e CNEN

<sup>1</sup> Esta norma, CNEN-NE-6.02 “Licenciamento de Instalações Radiativas”, foi revogada e substituída pela resolução CNEN n°112, de 24 de agosto de 2011, publicada no Diário Oficial da União em 01.09.2011.

(2002). Porém, todas estas normas avaliam qualitativamente a resistência dos embalados e não impõem limites de aceitação no caso de queda livre, o qual é o foco deste trabalho.

Tabela 2 - Rejeitos de baixo e médio nível de radiação produzidos na operação normal da CNAAA (ETN, 2003)

Rejeito	Composição	Embalado
RP de Angra 1	Proveniente dos sistemas de purificação do refrigerante do primário, sistema de purificação da piscina de	Imobilizado em matriz sólida <sup>a</sup> em tambor de 200 litros ou em "liner" (1m <sup>3</sup> ).
RP de Angra 2	elementos combustíveis e sistema de processamento de rejeitos líquidos.	Imobilizado em matriz sólida <sup>a</sup> em tambor de 200 litros.
RC	Materiais plásticos, papéis, luvas, roupas, etc.	Compactados em tambor de 200 litros.
RNC	Materiais metálicos em geral.	Caixa metálica (1,248 m <sup>3</sup> ) ou tambor de 200 litros, imobilizado ou não em matriz sólida <sup>a</sup> .
CE	Oriundo dos sistemas de purificação e tratamento de efluentes das usinas.	Imobilizado em matriz sólida <sup>a</sup> em tambor de 200 litros.
F	Oriundo dos sistemas de purificação do refrigerante do primário	Imobilizado em matriz sólida <sup>a</sup> em tambor de 200 litros.
RS	Proveniente do sistema de purificação da purga dos geradores de vapor (circuito secundário) de Angra 1.	Imobilizado em matriz sólida <sup>a</sup> em tambor de 200 litros.

<sup>a</sup> Em Angra 1 os rejeitos são imobilizados em matriz sólida de cimento e em Angra 2, em matriz sólida de betume.

Estudos de gerenciamento destes embalados apontam como principais cenários de acidentes a queda livre e o incêndio (Ahn *et al.*, 2008, 2009). Este dois cenários levariam à liberação de radioatividade no ambiente e, conseqüentemente, a doses



radiológicas no indivíduo do público, ou seja, qualquer membro da população não submetido à exposição ocupacional ou exposição médica (CNEN, 2005).

O cálculo da dose nestes cenários envolve inventário de radionuclídeos, taxa de liberação, dados meteorológicos, fator de dispersão atmosférica ( $\chi/Q$ ) e fatores de conversão de dose. Anh et al (2010a,b) analisaram quatro categorias de embalados gerados por todos os reatores nucleares da República da Coreia e a pluma radioativa gerada pela queda de embalados foi calculada pelo modelo de dispersão gaussiano descrito em (NRC, 1983).

Nirex (2003a,b) mostram o cálculo de risco de acidentes no Reino Unido e detalham os parâmetros considerados nos modelos como, por exemplo, a taxa de radionuclídeos liberados para os cálculos de dose.

Os modelos de dispersão atmosférica utilizados hoje nos processos de licenciamento de instalações radioativas são modelos de pluma gaussiana, que utilizam as classes de estabilidade Pasquill-Gifford para determinar os coeficientes de dispersão (Till e Grogan, 2008; Seinfeld e Pandis, 2006). Estes modelos apresentam resultados em concordância com medidas experimentais em terrenos planos e alguns ajustes podem ser feitos para levar em consideração a altura de liberação, camada limite, deposição e outros fatores. NRC (1983) é uma norma americana onde o modelo gaussiano é utilizado conservadoramente.

Podem-se citar alguns softwares utilizados para fins reguladores como ISCST3 (EPA, 2013), ARTM, CALLPUFF, AERMOD (Weblakes, 2012) e XOQDOC (NRC, 1982) que são modelos de dispersão gaussianos avançados. AERMOD usa o modelo gaussiano apenas para tratamento horizontal e vertical para condições estáveis e uma função densidade de probabilidade não-gaussiana para tratamento vertical em condições instáveis. De maneira geral, estes pacotes possuem pré-processadores para as condições do terreno e condições atmosféricas. Uma comparação das características dos modelos de dispersão AERMOD e ISCST3 foi feita em EPA (2003) entre tipos de fontes modeladas, elevação da pluma, tratamento urbano, camada limite, entre outras características.

A fluidodinâmica computacional tem sido usada para problemas de dispersão atmosférica, por fornecer uma abordagem mais realista das condições de liberação. Na indústria de processos químicos já existem softwares que utilizam a CFD para o cálculo de dispersão de poluentes como, por exemplo, ARIA Local, MISKAM e MICRO-CALGRID (Weblakes, 2012). Vários artigos estão sendo publicados a fim de explorar a

enorme capacidade desta ferramenta de modelar cenários de dispersão (Sampaio *et al.*, 2008; Mazzoldi *et al.*, 2008; Riddle *et al.*, 2004). Mazzoldi *et al.* (2008) e Riddle *et al.* (2004) fizeram comparações de modelos gaussianos com o uso da fluidodinâmica computacional e concluíram que a CFD, apesar de necessitar de um maior esforço computacional, é mais apropriado para situações que envolvem topografias complexas.

## ***Capítulo 3 Características do sítio***

O CGR está localizado a 55 metros de altitude (23°0' S, 44°30' W) na CNAAA, no litoral do Estado do Rio de Janeiro (Figura 1). O site possui uma topografia complexa, dificultando o uso de modelos gaussianos, o que justifica o uso das duas abordagens utilizadas neste trabalho para a dispersão atmosférica. Neste Capítulo são feitas uma descrição do cenário e uma apresentação dos dados meteorológicos disponibilizados pela Eletrobrás Termonuclear S.A., assim como a caracterização do termo fonte. Todos estes passos são essenciais para definir os parâmetros utilizados nos modelos de dispersão atmosférica do Capítulo 4.



Figura 1 - Imagem de satélite da CNAAA, com ênfase no Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR).

### **3.1 Descrição do cenário**

O Prédio de Monitoração será construído entre os depósitos 1 e 2 (Figura 2) do CGR. Os embalados serão movimentados no prédio através de uma ponte rolante e uma talha elétrica e, de acordo com a sua classificação e medição ao longo do prédio, passarão por salas para receber embalados, medições radiométrica e isotópica de

embalados, abertura de embalados e segregação de materiais contaminados, recompactação de rejeitos radioativos, manipulação de materiais reutilizáveis e medição e descarte de rejeito industrial convencional (ETN, 2010). O prédio será equipado também com sistemas de ventilação, condicionamento de ar, proteção contra incêndio, monitoração da radiação, gás P-10, ar comprimido, comunicação, proteção física, drenagem e coleta de drenagem.

Existirão cinco rotas de movimentação dos embalados dentro do prédio, nas quais os embalados serão içados até uma altura máxima de 6,5 metros para o seu deslocamento. Segundo uma análise preliminar destas rotas, a queda livre de um embalado pode levar à liberação de material radioativo que poderá entrar em suspensão e ser liberado para fora do prédio por falha no desligamento do sistema de ventilação, formando uma nuvem radioativa. Neste trabalho, este cenário é simulado considerando-se um termo fonte igual a uma fração da atividade total do embalado, como discutido na Seção 3.3.

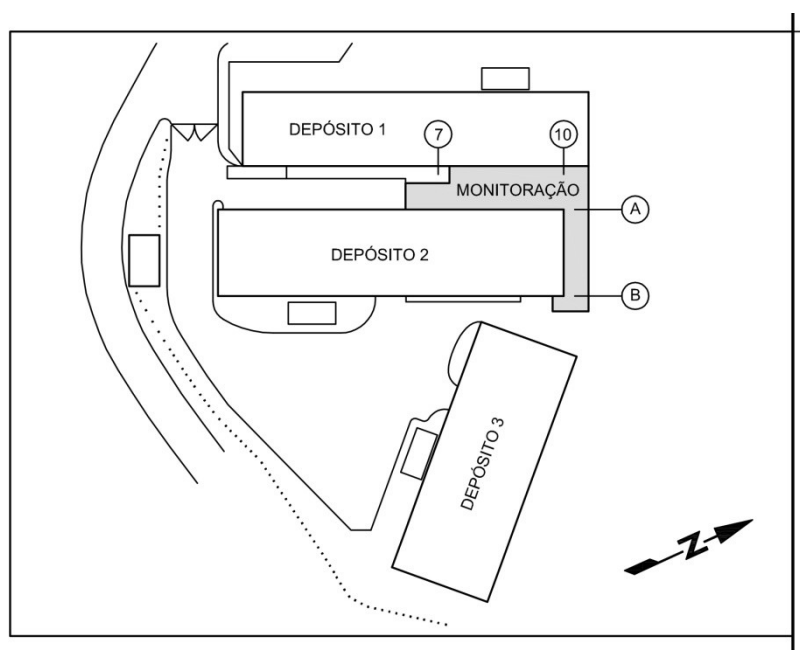


Figura 2 - Prédio de Monitoração do CGR (fora de escala) (ETN, 2010).

### 3.2 Perfil de velocidade do vento e estabilidade da região

Antes de avaliar o perfil de velocidade e as classes de estabilidades da região da CNAAA, é importante conhecer as categorias de Pasquill-Gifford. Estas categorias de estabilidade são exaustivamente usadas em problemas de turbulência atmosférica e foram propostas por Pasquill (1961, *apud* Till e Grogan, 2008) com base em medições

de propagação da pluma. Estas categorias são denominadas de A a F e estão resumidas na Tabela 3.

Tabela 3 - Relação dos tipos de turbulência atmosférica com as condições do tempo (Pasquill, 1961, *apud* Till e Grogan, 2008).

Velocidade do vento na superfície (m/s)	Insolação diurna <sup>a</sup>			Condições noturnas <sup>b</sup>	
	Forte	Moderada	Leve	Ligeiramente nublado ou 3/8 de nebulosidade <sup>b</sup>	≥ 3/8 de nebulosidade
< 2	A	A	B	-	-
2	A - B	B	C	E	F
4	B	B - C	C	D	E
6	C	C - D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

<sup>a</sup> A - extremamente instável; B - moderadamente instável; C - levemente instável; D - condições neutras; E - condições levemente estáveis; F - condições moderadamente estáveis.

<sup>b</sup> O grau de nebulosidade é definido como a fração do céu acima do horizonte local aparente que é coberto por nuvens.

Existe ainda, uma sétima classe de estabilidade, denominada G, que foi incorporada mais tarde e seria a condição extremamente estável.

Para avaliar o perfil de velocidade do vento e estabilidade atmosférica da região, foram utilizadas as saídas do programa ADELTA, em Fortran, que realizava a extração do cadastro de dados meteorológicos da CNAAA da torre meteorológica A (FURNAS, 1985, *apud* Oliveira Jr. *et al.*, 2010). Os dados utilizados neste trabalho referem-se apenas à saída do programa ADELTA para a torre A-10, cujas características estão na Tabela 4. Estes arquivos de saída, por sua vez, possuem apenas informações do número de horas de calmaria<sup>2</sup> e horas que o vento soprou em classes de velocidades e direção, para cada classe de estabilidade, estruturado como descrito na Tabela 5 (o vento é classificado em 16 direções e 12 faixas de velocidades).

<sup>2</sup> A calmaria é toda situação na qual a velocidade do vento está abaixo da velocidade de partida do senso e igual a 0,36 m/s neste caso (FURNAS, 1985, *apud* Oliveira Jr. *et al.*, 2010).

Tabela 4 - Características da torre meteorológica A-10 existente na CNAAA.

Torre	Coordenadas geográficas	Altitude da base da torre	Altitude das medidas	Variáveis meteorológicas*
A-10	23° 00' 9" S, 44° 00' 30" W	50 metros	60 metros	u (m/s), dir(°) e T (°C)

\*u - velocidade do vento; dir - direção do vento; T - temperatura ambiente.

Tabela 5 - Estrutura dos arquivos.

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO
CALMA(I), I=1,7	Número de horas de calma para cada classe de estabilidade
$\left. \begin{array}{l} 7 \text{ vezes} \\ \left[ \begin{array}{l} 12 \text{ VEZES} \\ \left[ \begin{array}{l} P(L,I,J), \\ L=1,16 \end{array} \right] \end{array} \right. \end{array} \right\}$	Número de horas durante as quais o vento soprou na direção L com velocidade dentro da classe de velocidade J sob condições de estabilidade dentro da classe de estabilidade I.

Existe um arquivo para cada mês e ano especificados pelo nome. Por exemplo, para dados de abril de 2002, há um arquivo nominado DT1ABR02. Para ler todos os dados do período de janeiro de 2000 a dezembro de 2008 e trabalhar com estas informações, foi feito o programa, em Fortran 90, Rosa dos Ventos (Apêndice I).

O número de horas que o vento soprou em cada uma das doze classes de velocidade e as 16 direções (separadas em 22,5°) para todo o período avaliado está na Tabela 6. A frequência de cada classe de estabilidade durante cada período está na Figura 3. Podemos ver que as classes preponderante são D, E e F, o que está de acordo com Oliveira Jr. *et al.* (2010), que avaliaram os dados da torre A no período de 1980 a 2006. As frequências das classes de estabilidade durante o período de calmaria podem ser vistas na Figura 4. Por último, as frequências das classes de velocidade mais preponderantes nas classes de estabilidade D, E e F estão nas Figuras 5, 6 e 7 respectivamente.

Tabela 6 - Classes de velocidade do vento (período de jan/2000 - dez/2008).

Direção	Classe de velocidade do vento (m/s)												Total
	0,36	0,51	0,76	1,1	1,6	2,1	3,1	5,1	7,1	10,0	13,1	18,1	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	0,50	0,75	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0	7,0	10,0	13,0	18,0	50,0	
N	2438	10713	33752	120576	83389	20522	465	0	0	0	0	5	271860
NNE	2058	7629	18724	64279	48944	14911	1079	12	0	10	0	0	157646
NE	993	2694	4826	10007	5879	5654	1132	17	0	0	0	0	31202
ENE	490	1622	2080	4085	2928	2597	777	36	0	0	0	20	14635
E	483	1304	2018	3757	2176	1139	94	0	0	0	0	0	10971
ESE	392	1449	2126	5371	2833	758	60	0	0	0	0	0	12989
SE	369	1466	2472	5118	1672	540	48	0	0	0	0	0	11685
SSE	417	1844	3021	5236	1774	604	36	0	0	0	0	0	12932
S	497	2321	5135	18411	17206	4345	97	0	0	0	0	0	48012
SSW	1152	4339	10063	40429	40866	16963	1866	48	12	0	0	0	115738
SW	1826	6087	14609	37482	18119	8485	3001	162	0	0	0	0	89771
WSW	884	3742	6079	9388	3611	3885	1337	96	5	0	0	0	29027
W	665	1960	4075	5868	2920	2570	380	0	0	0	0	0	18438
WNW	555	2085	4624	6916	3664	2453	146	0	0	0	0	0	20443
NW	939	2784	6337	9146	3445	957	84	0	0	0	0	0	23692
NNW	1095	4730	10589	15497	4253	1447	141	0	0	0	0	0	37752
TOTAIS	15253	56769	130530	361566	243679	87830	10743	371	17	10	0	25	906793

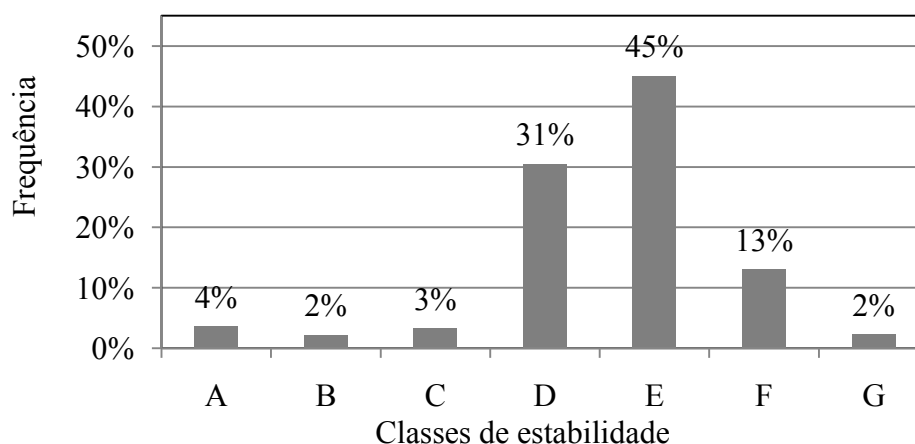


Figura 3 - Frequência das classes de estabilidade de Pasquill-Gifford (jan/2000 - dez/2008).

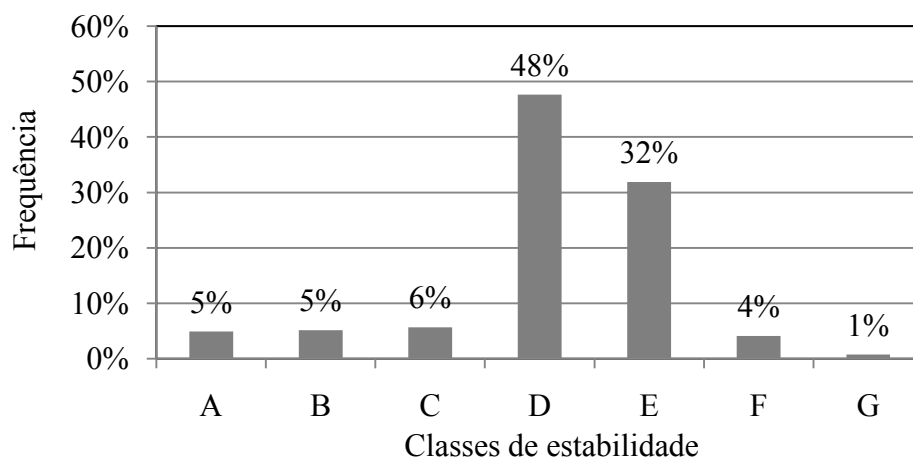


Figura 4 - Frequência das classes de estabilidade de Pasquill-Gifford durante período de calmaria (jan/2000 - dez/2008).

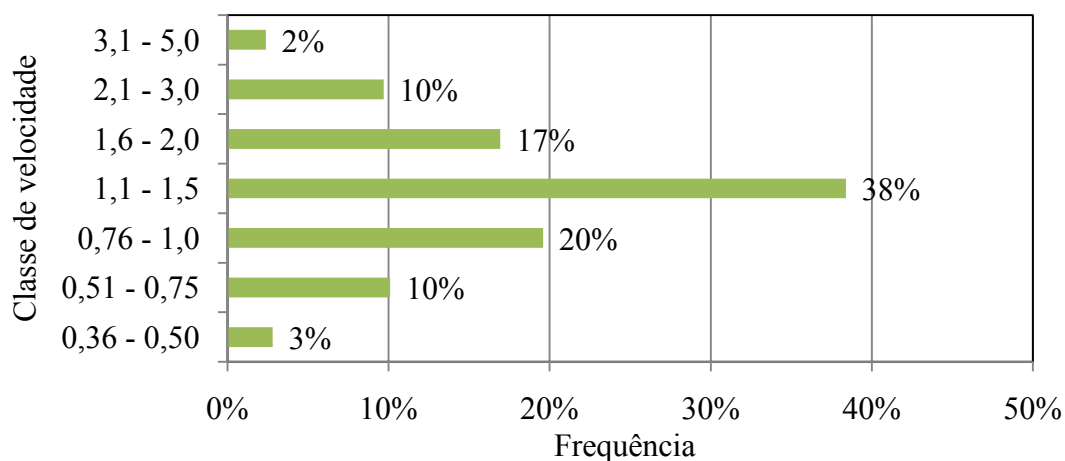


Figura 5 - Frequência da velocidade do vento para classe de estabilidade D (jan/2000 - dez/2008).

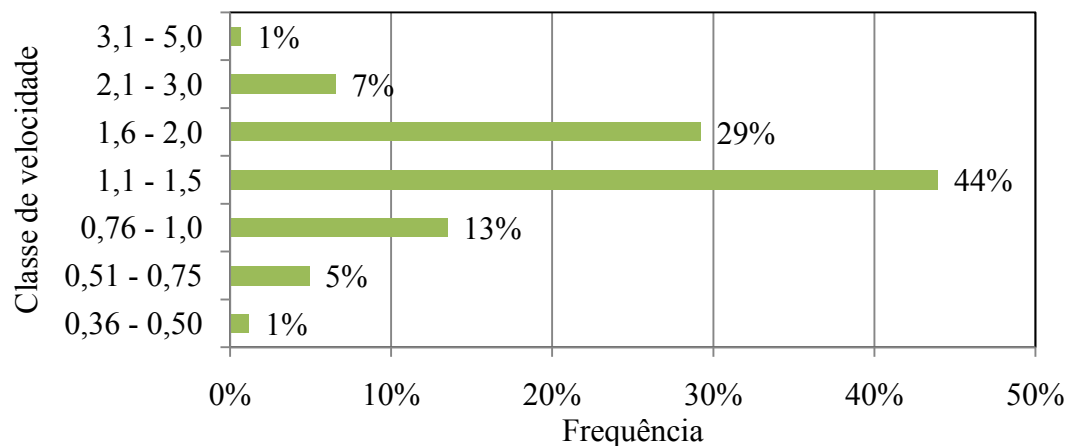


Figura 6 - Frequência da velocidade do vento para classe de estabilidade E (jan/2000 - dez/2008).



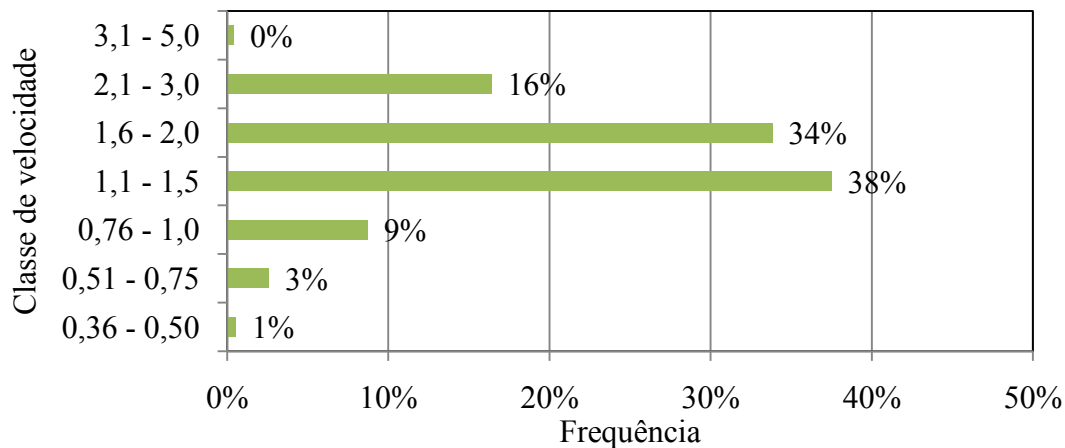


Figura 7 - Frequência da velocidade do vento para classe de estabilidade F (jan/2000 - dez/2008).

As frequências das direções de vento para as classes de estabilidades D, E e F estão nas figuras 8, 9 e 10, respectivamente, para todas as horas disponíveis e para as horas nas quais o vento soprou com as duas velocidades mais preponderantes. Neste ponto, é importante ressaltar que pelas condições do sítio, próximo ao mar, a direção do vento varia do período diurno para o noturno. Não foi possível fazer esta avaliação com os dados utilizados neste trabalho, porém ela pode ser vista em Oliveira Jr. *et al.* (2010), onde se identificou que as direções preferenciais do vento são S, SSW, SSE no período diurno e N, NNE, NNW e E no noturno.

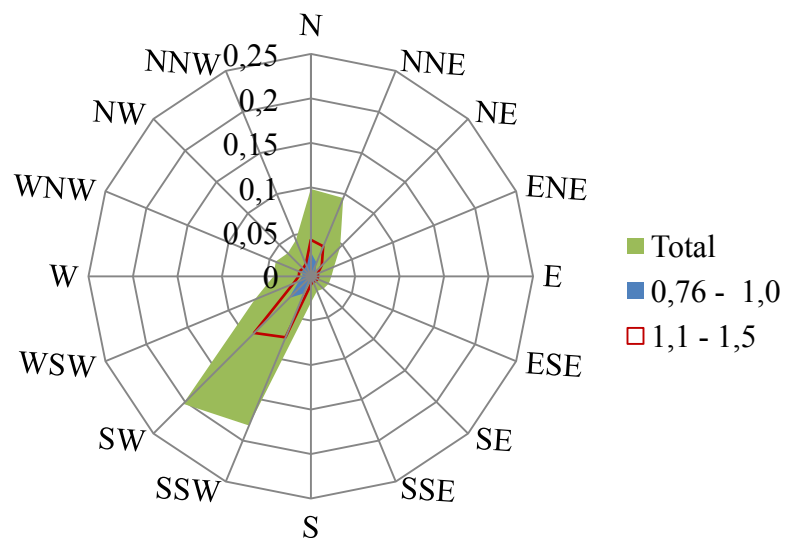


Figura 8 - Frequência de direção de vento na classe de estabilidade D (período de jan/2000 - dez/2008).

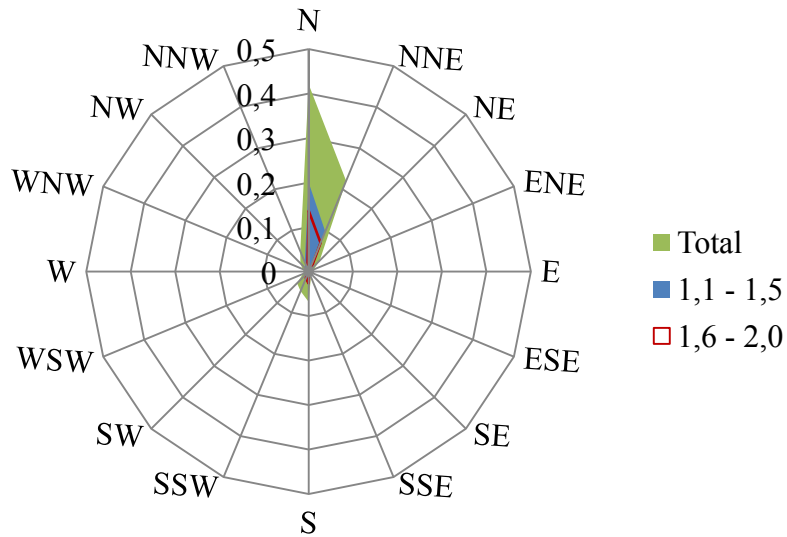


Figura 9 - Frequência de direção de vento na classe de estabilidade E (período de jan/2000 - dez/2008).

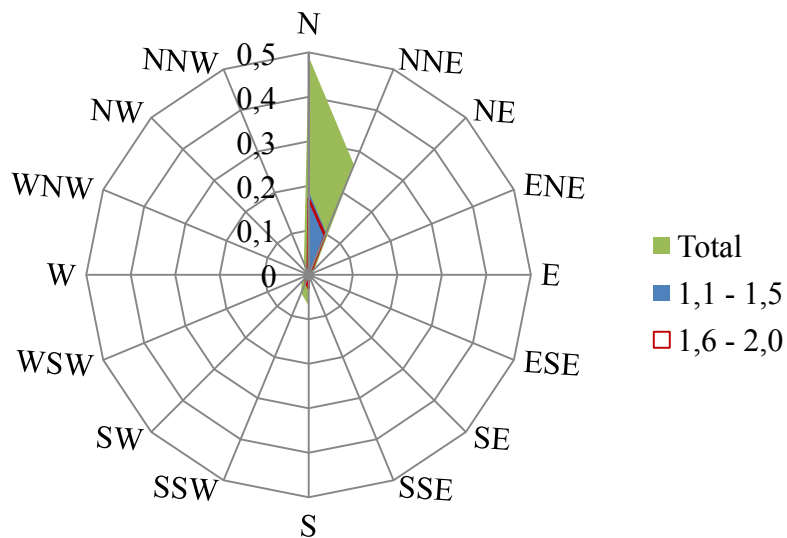


Figura 10 - Frequência de direção de vento na classe de estabilidade F (período de jan/2000 - dez/2008).

De uma maneira geral, a avaliação dos dados meteorológicos da central nuclear mostrou uma predominância de ventos fracos, com forte estabilidade e ar estagnado. Tanto no período diurno quanto no noturno, as classes de estabilidade predominantes são D, E e F, mostrando que mesmo com a turbulência causada pela radiação solar e

diferenças de temperatura, a região continua predominantemente estável (Oliveira *et al.*, 2010).

Para simplificação do estudo neste trabalho e a partir da avaliação feita nesta Seção e buscando pontos mais próximos onde o indivíduo do público estaria sujeito a uma maior concentração, dois pontos críticos foram selecionados (o ponto ao norte a 1000 metros do ponto de liberação e o ponto mais próximo a 650 metros), nas direções NE e N. Estes pontos representam o local mais próximo e a direção preferencial do vento em direção a costa. Pode-se notar na Figura 11 que estes pontos estão em na rodovia Rio-Santos próxima à CNAAA.



Figura 11 - Ponto ao norte e ponto mais próximo.

### 3.3 Descrição dos embalados

A fim de otimizar o número de casos a serem estudados, foram escolhidos quatro tipos de embalados: tambor de 200 litros contendo resina do primário imobilizada em cimento (RP1), tambor de 200 litros contendo resina do primário imobilizada em betume (RP2), tambor de 200 litros contendo rejeito compactado (RC) e *liner* contendo resina do primário imobilizada em cimento. Esta seleção foi baseada no maior nível de atividade (resina do primário) e na imobilização ou não em matriz sólida (RC é o único rejeito não imobilizado). A imobilização em matriz sólida é uma medida de segurança que dificulta a liberação dos radionuclídeos para o meio ambiente. A Figura 12 mostra fotos dos tambores de 200 litros utilizados em Angra 1 e 2.

As atividades de cada radionuclídeo contido nestes embalados estão na Figura 13 (ETN, 2012,2005a,b; Alves, 2008).



Figura 12 - Tambores de 200 litros de (a) Angra 1 e (b) Angra 2 (ETN, 2003).

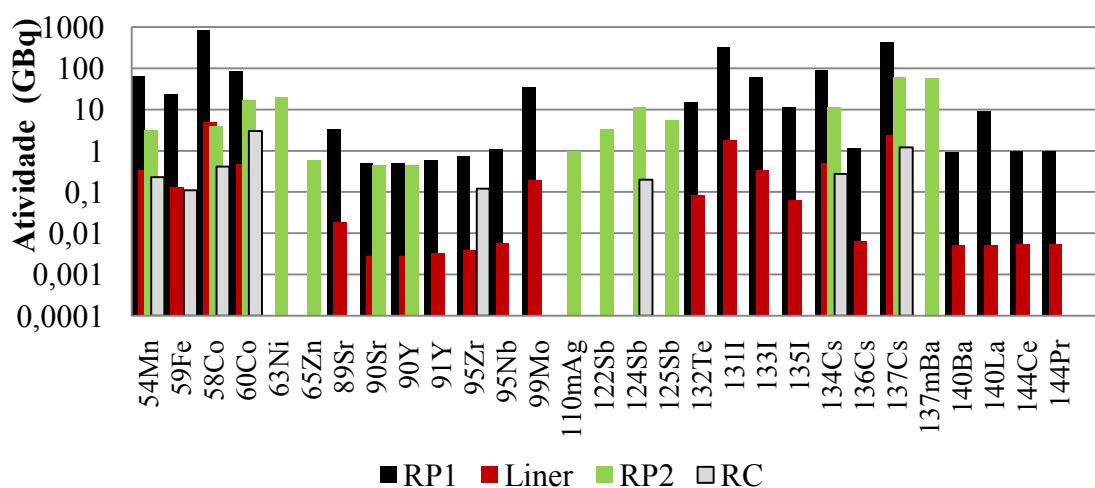


Figura 13 - Atividades dos embalados (ETN, 2012,2005a,b; Alves, 2008).

Nirex (2003b) mostra frações de liberação devido à queda livre de tambores de 500 litros de até 0,0015 do conteúdo total do embalado e Ahn *et al.* (2010a), uma fração de até 0,001 para tambores de 200 litros contendo resina do primário ou rejeitos compactados. Conservadoramente, por não se ter, neste trabalho, informações específicas dos embalados em estudo, assumiu-se uma fração igual a 0,03 para estimar o termo fonte do cenário. O Capítulo 6 apresenta uma análise de sensibilidade para esta fração e outros parâmetros considerados ao longo do problema.

# Capítulo 4 Dispersão atmosférica

A maioria dos estudos de dispersão atmosférica de radionuclídeos devido à liberação em centrais nucleares utiliza modelos de difusão gaussianos (Sampaio *et al.*, 2008). Estes modelos originam-se de soluções analíticas tridimensionais da equação de condução (Till e Grogan, 2008) e não consideram o problema de escoamento do fluido. Em contrapartida, a fluidodinâmica computacional, ou dinâmica computacional dos fluidos, utiliza as equações de Navier-Stokes e é capaz de modelar problemas de turbulência em geometrias complexas, como será discutido neste Capítulo.

## 4.1 Considerações gerais

Para a simulação com os dois modelos admite-se que, uma vez ocorrido o acidente, toda a fração de radionuclídeos liberada devido à queda livre do embalado entra em suspensão no ar e é liberada a uma taxa constante, por um tempo suficientemente longo para considerar um estado estacionário. Assume-se, também, que o sistema de ventilação do depósito fica em operação até que todo o termo fonte em suspensão seja liberado para fora do prédio.

Para tornar possível a comparação dos modelos, foi estimada uma taxa de ar exfiltrado<sup>3</sup> do sistema de ventilação igual a  $5 \times 10^{-4}$  kg/s. De fato, este valor não influencia no cálculo da dose, pois independente da taxa de ar exfiltrado, a quantidade de atividade liberada (em Bq) será a mesma. Dessa forma, uma vez encontrada a concentração em  $\text{kg/m}^3$ , a concentração em  $\text{Bq/m}^3$  é encontrada pela Equação (1), onde a massa de ar contaminada ( $M_{ar}$ ) é calculada na unidade de tempo dos fatores de dose, do Capítulo 5, ou seja, em um ano.

$$\chi[x, y, z, i] = \frac{C[x, y, z] \times l \times A_0[i]}{M_{ar}} \quad (1)$$

onde

$C[x, y, z]$  é a concentração em  $\text{kg/m}^3$ ;

$l$  é fração liberada devido à queda (3%);

$A_0[i]$  é a atividade inicial de cada radionuclídeo  $i$  (Figura 13);

---

<sup>3</sup> Ar liberado para fora do prédio, em analogia com o inglês *exfiltration*, utilizado aqui como antônimo de infiltrado.

A velocidade do vento para ambos os modelos foi considerada igual a 1,3 m/s, por ser a velocidade mais frequente encontrada na Seção 3.3. Uma análise de sensibilidade deste parâmetro será feita no Capítulo 6.

## 4.2 Modelo gaussiano (ou de Pasquill-Gifford)

De acordo com o modelo gaussiano, desenvolvido por Pasquill (1962, *apud* Crowl e Louvar, 2011), a concentração da nuvem radioativa, em  $\text{kg/m}^3$ , devido ao termo fonte estacionário  $Q_m$ , em  $\text{kg/s}$ , a uma altura  $H_r$ , acima do nível do solo, em metros, com vento na direção  $x$  e velocidade constante  $u$ , em  $\text{m/s}$ , é dada pela Equação (2), com reflexão total da pluma no solo (em  $z = 0$ ).

$$\langle C \rangle(x, y, z) = \frac{Q_m}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \times \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (2)$$

onde  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  são os coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford para campo aberto, dependentes da direção de dispersão  $x$ . Estes coeficientes são usualmente válidos para distância de  $10^2$  a  $10^4$  metros da fonte.

Foram assumidas para as direções NE e N a classe de estabilidade E e velocidade do vento igual a 1,3 m/s, que são a classe de estabilidade e velocidade mais frequentes do site, conforme visto na Seção 3.3. De acordo com (NRC, 1983), como o ponto mais próximo está acima do ponto de liberação, a concentração neste ponto foi calculada no nível do solo para uma altura de liberação de 15 metros (altura do prédio). Para o ponto ao norte, a concentração é calculada no centro da pluma (maior concentração) para uma altura de liberação de 65 metros (elevação do prédio em relação ao nível do mar mais a altura do prédio, Figura 11).

## 4.3 Fluidodinâmica Computacional

A simulação numérica foi realizada através do código computacional CFX ANSYS<sup>TM</sup> 14.0, o qual utiliza as equações RANS e é baseado no método de volumes finitos (ANSYS, 2011). Um esquema das etapas do pacote ANSYS<sup>TM</sup> está resumido na Figura 14.

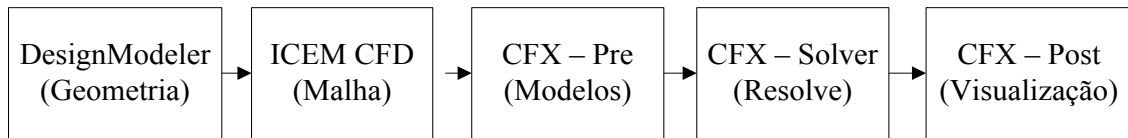


Figura 14 - Etapas do pacote ANSYS™ para dinâmica dos fluidos.

A fluidodinâmica computacional utiliza diferentes métodos para o tratamento de escoamentos turbulentos como resultado da incapacidade computacional existente hoje de resolver o problema para todo o tempo e escalas de turbulência. Os conceitos básicos utilizados no CFX são discutidos na Seção 4.3.1 e os parâmetros usados na simulação deste trabalho estão na Seção 4.3.2.

### 4.3.1 Conceitos básicos do CFX

Os modelos de turbulência buscam resolver um conjunto de equações de transporte modificadas pela introdução de componentes médios e flutuantes. Se definirmos a velocidade turbulenta como uma média,  $\bar{U}_i$  mais uma flutuação,  $u_i$ , temos:

$$U_i = \bar{U}_i + u_i \quad (3)$$

onde

$$\bar{U}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U_i dt$$

e  $\Delta t$  é um tempo escalar grande em relação às flutuações turbulentas, mas pequeno em relação ao tempo em que as equações são resolvidas.

Substituindo a grandeza média na equação de transporte, o resultado são as equações de Navier-Stokes médias de Reynolds, Equações (4-5).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{U}_i) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{U}_i \bar{U}_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) \quad (5)$$

onde

$\tau_{ij}$  é o tensor de tensão molecular (incluindo as componente normais e cisalhantes);

$p$  é a pressão;

$\overline{u_i u_j}$  é chamado tensor de Reynolds.

A partir do tensor de Reynolds são introduzidos os modelos de turbulência. Porém, não é objetivo deste trabalho apresentar uma discussão destes modelos e sim, realizar

uma aplicação simples da ferramenta a fim de obter os primeiros resultados do que seria a solução mais realista do problema de dispersão. Mais detalhes dos modelos de turbulência podem ser encontrados em Ferziger e Peri (1996).

O CFX utiliza o método de volumes finitos, o qual envolve a discretização do domínio espacial utilizando uma malha tridimensional. Esta malha é usada para construir os volumes finitos, os quais usam a conservação de quantidades relevantes, como massa, momento e energia.

### ***4.3.2 Parâmetros utilizados***

O primeiro passo para a simulação é determinar a geometria do problema. Duas geometrias são propostas para o cálculo da dispersão: a) a primeira para o ponto mais próximo, com o vento na direção NE (geometria nº 1) e; b) a segunda para o ponto ao norte, com o vento nesta mesma direção (geometria nº 2). A simulação de todo o sítio em uma mesma geometria seria possível se fosse utilizado outro pacote computacional, pois a dimensão máxima do volume gerado no DesignModeler é 1km×1km×1km. Porém, para simular todo o sítio seria necessário um maior número de considerações sobre a topologia.

Os domínios das duas geometrias descritas a seguir estão indicados na Figura 15. Na geometria nº 1, segue-se o seguinte caminho: o Prédio de Monitoração do CGR está a 55 metros acima do nível do mar e a uma distância horizontal de 200 metros do mar. Considera-se uma região plana de 100 metros onde o prédio está localizado. O prédio tem uma altura de 15 metros e área de liberação igual a 10×10 m<sup>2</sup>. Em seguida, há uma elevação de 100 metros a uma distância de 250 metros. Forma-se uma região plana de mais 100 metros até uma descida de 250 metros na direção horizontal e 50 metros na vertical até o ponto mais próximo da rodovia Rio-Santos (BR-101).

Na geometria nº 2, para o vento na direção N, a nuvem passa por um vale, onde estão as usinas Angra 1 e 2, até chegar ao ponto ao norte na rodovia. Existe uma região plana de 100 metros, onde o prédio está localizado. Em seguida, há um declínio de 50 metros em uma distância de 200 na direção norte. O vale tem mais 700 metros até a subida para a estrada.





Figura 15 - Domínio da geometria nº 1 (em vermelho) e da geometria nº 2 (em verde)

O segundo passo da simulação é determinar a malha (Figura 16) através do software ANSYS ICEM CFD™ 14.0. Foi utilizada uma malha não estruturada e os dados para geração estão na Tabela 7.

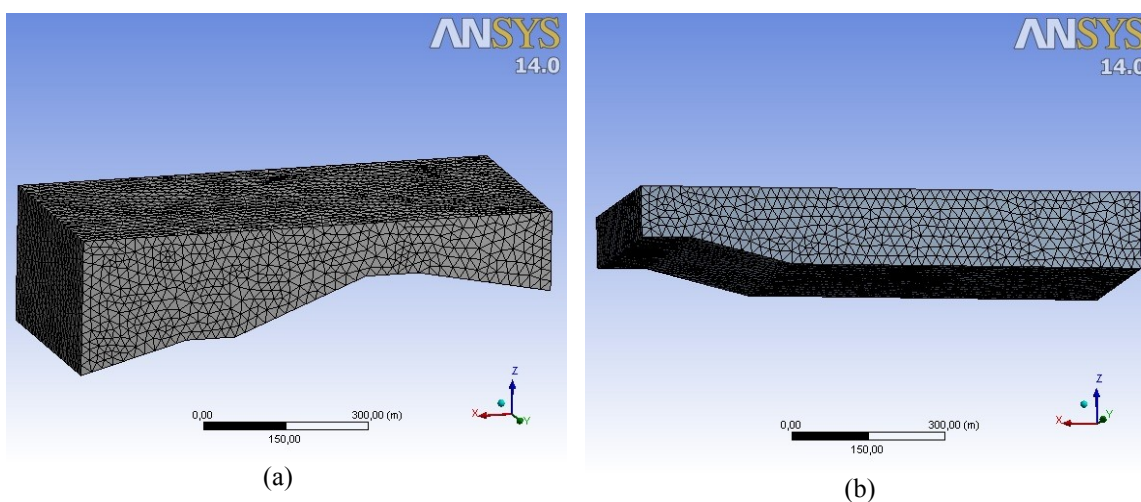


Figura 16 - Malhas não-estruturadas para geometria nº 1 (a) e geometria nº 2 (b).

No CFX-Pre são introduzidos os dados do modelo de escoamento. Para ambas as geometrias os dados principais estão na Tabela 8. O modelo de turbulência k-Epsilon foi escolhido por não necessitar de equações para as paredes e a difusividade cinemática foi considerada constante e igual em todas as direções com o valor de  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , para fumaça no ar (ANSYS, 2011). Este foi o valor mais próximo encontrado na literatura para o problema e é feita uma análise de sensibilidade deste parâmetro indicada no Capítulo 6.

Tabela 7 - Principais parâmetros de entrada no ICEM.

Entradas	Tamanho mínimo (m)	0,5
	Tamanho máximo na face (m)	20,0
	Tamanho máximo (m)	50,0
	Taxa de crescimento	1,2
	Comprimento mínimo na borda (m)	15
	Refinamento*	3
Estatísticas	Nodos (geo. 1)	11732
	Elementos (geo. 1)	58370
	Nodos (geo. 2)	10671
	Elementos (geo. 2)	52841

\*nas paredes do prédio

Tabela 8 - Principais parâmetros de entrada no CFX.

Domínio	Fluido	Ar a 25°C
	Transferência de calor	Isotérmica a 25°C
	Turbulência	k-Epsilon
	Variável adicional	Equação de transporte
	Difusividade cinemática	$10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Contorno	Velocidade normal	1,3 m/s
Vento	Turbulência	Média (5%)
Contorno	Taxa de liberação	$5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$
Liberação	Turbulência	Média (5%)
Contorno	Tipo	Aberto
Atmosfera	Pressão relativa	0 Pa
Controle da solução	Aprox. Num. turbulência	Primeira ordem
	RMS	$10^{-4}$

Uma vez fornecidos todos os parâmetros, a concentração da nuvem é encontrada, em  $\text{kg/m}^3$ , resolvendo o problema pelo CFX-Solver.

## Capítulo 5 Cálculo de dose

Após a avaliação da dispersão atmosférica, cujo produto é concentração de atividade no ar, a dose neste acidente é calculada acumulando a dose devida à inalação do ar ( $E_{inh}$ ) e a dose devida à imersão na nuvem radioativa ( $E_{im}$ ), para cada radionuclídeo, E. (6) (AIEA, 2001).

$$E = \sum_i E_{inh} + E_{im} \quad (6)$$

A dose devida à inalação é determinada utilizando-se a Eq. (7), em Sv, onde  $C_A$  é a concentração do radionuclídeo no ar, em Bq/m<sup>3</sup>, ou seja, já calculada pela Eq. (1);  $R_{inh}$  é a taxa de inalação em m<sup>3</sup>/ano, apresentada na Tabela 9 (Dias, 2002) e;  $DF_{inh}$  é o coeficiente de dose por inalação em Sv/Bq (CNEN, 2006).

$$E_{inh} = C_A R_{inh} DF_{inh} \quad (7)$$

A taxa de inalação (Dias, 2002) foi estimada para apenas cinco faixas etárias, mas foi adaptada para abranger as seis faixas etárias da posição reguladora CNEN3.01/11 (CNEN, 2011). Além disso, o coeficiente de dose por inalação é dado em CNEN (2011) para três categorias de absorção pulmonar (rápida, ou *fast* em inglês; moderada, ou *moderate*; lenta, ou *slow*). Foi utilizado o maior valor dentre estas categorias.

Tabela 9 - Taxa de inalação - adaptado de Dias, (2002).

Faixa etária (anos)	Taxa de inalação (m <sup>3</sup> /ano)
≤ 1	1400
1 a 2	1400
2 a 7	3700
7 a 12	8000
12 a 17	8000
>17	8400

Segundo AIEA (2001), a dose devido à imersão em nuvem radioativa é determinada utilizando-se a Eq. (8), em Sv, onde  $DF_{im}$  é o coeficiente de dose devido à imersão, em Sv/ano por Bq/m<sup>3</sup> e  $O_f$  é a fração do ano no qual o grupo crítico é exposto.

$O_f$  é considerado igual a 1 de modo que  $M_{ar}$  da Eq. (1) represente a massa total liberada em um período de um ano:

$$E_{im} = C_A D F_{im} O_f \quad (8)$$

Outras fontes de dose devido à deposição no solo por precipitação ou ingestão de água e alimentos contaminados não foram consideradas por se tratar de caminhos mais longos para contribuir para a dose no indivíduo.

## Capítulo 6 Resultados

As concentrações nos centros da plumas ( $y = 0$ ) para os dois casos analisados neste trabalho podem ser vistas nas Figuras 17-20. Nas Figuras 17-18 está mostrada a distância do Prédio de Monitoração até o ponto mais próximo na estrada. Nas figuras 19-20 está mostrada a distância do Prédio de Monitoração até o ponto ao norte. Todo o modelo gaussiano foi calculado através do software Mathematica 7.0 (Wolfram, 2012) pelo código desenvolvido no Apêndice II.

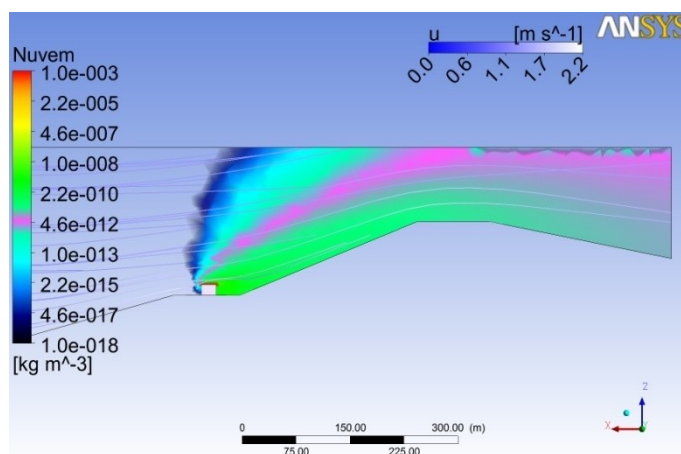


Figura 17 - Concentração da nuvem radioativa ( $\text{kg/m}^3$ ) e perfil de velocidade do vento  $u$  (m/s) para vento na direção NE. A nuvem se origina no Prédio de Monitoração do CGR e atinge o ponto mais próximo na rodovia. Geometria nº 1 (modelo CFD).

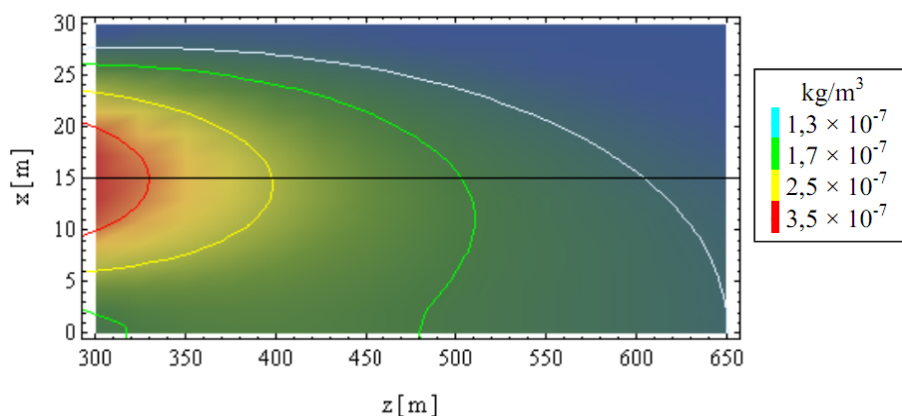


Figura 18 - Concentração da nuvem radioativa ( $\text{kg/m}^3$ ) e perfil de velocidade do vento para vento na direção NE. A nuvem se origina no Prédio de Monitoração do CGR e atinge o ponto mais próximo na rodovia. Isopletas da concentração estão mostradas (modelo gaussiano).

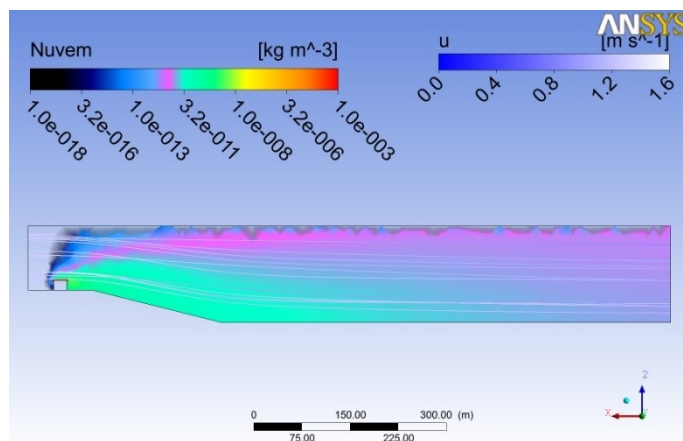


Figura 19 - Concentração da nuvem radioativa ( $\text{kg/m}^3$ ) e perfil de velocidade do vento  $u$  (m/s) para vento na direção N. A nuvem se origina no Prédio de Monitoração do CGR e atinge o ponto ao norte na rodovia. Geometria nº 2 (modelo CFD).

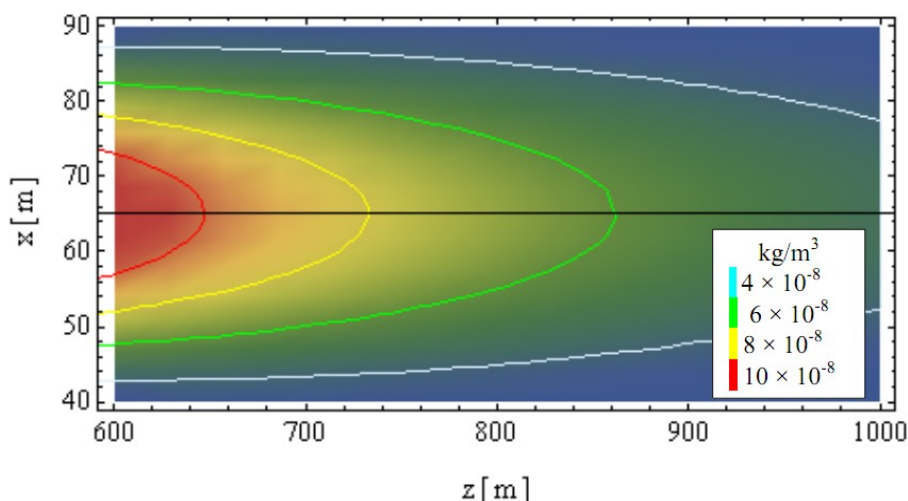


Figura 20 - Concentração da nuvem radioativa ( $\text{kg/m}^3$ ) e perfil de velocidade do vento para vento na direção N. A nuvem se origina no Prédio de Monitoração do CGR e atinge o ponto ao norte na rodovia. Isopletas da concentração estão mostradas (modelo gaussiano).

A concentração para a geometria nº 1 (Figura 17) através da CFD é da ordem de  $10^4$  vezes menor que a concentração estimada pelo modelo gaussiano (Figura 18). Enquanto a concentração para a geometria nº 2 (Figura 18) é da ordem de  $10^3$  menor que a concentração estimada pelo modelo gaussiano (Figura 19). A grande diferença entre os modelos é devido: 1) ao modelo gaussiano ser naturalmente conservador e; 2) ao modelo CFD estar muito simplificado. Porém, a diferença entre as geometrias nº 1 e 2, no modelo CFD, se deve à elevação da nuvem pela topografia da região. Essa elevação não é considerada no modelo gaussiano utilizado neste trabalho.

A CFD possibilita avaliar o perfil de velocidade ao redor do prédio, como por exemplo, pode ser visto na Figura 21, para o vento na direção NE. Esta ferramenta é muito útil quando se deseja calcular a concentração próxima ao ponto de liberação, onde o modelo gaussiano não é válido.

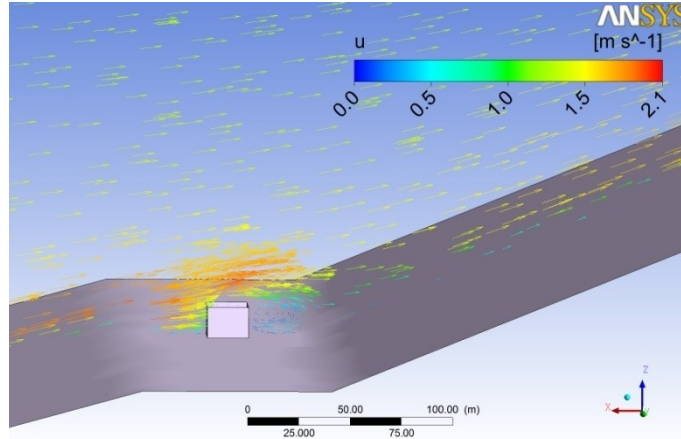


Figura 21 - Perfil de velocidade do vento u (m/s) próximo ao Prédio de Monitoração.

Os valores de dose encontrados para as seis faixas etárias estão nas Tabelas 10-13 para cada embalado. Para o ponto mais próximo, as doses máximas estão nas Tabelas 10 e 11 para os modelos gaussiano e CFD, respectivamente. Para o ponto ao norte, as doses máximas estão nas Tabelas 12 e 13 para os modelos gaussiano e CFD, respectivamente. Para o cálculo da dose nestes pontos utilizando o modelo CFD, considerou-se a maior concentração no plano perpendicular ao vento e na distância do ponto de liberação até a rodovia, ou seja, 650 metros para o ponto mais próximo e 950 metros para o ponto ao norte. Isoplefas neste plano podem ser vistas nas Figuras 22 e 23 para os dois casos.

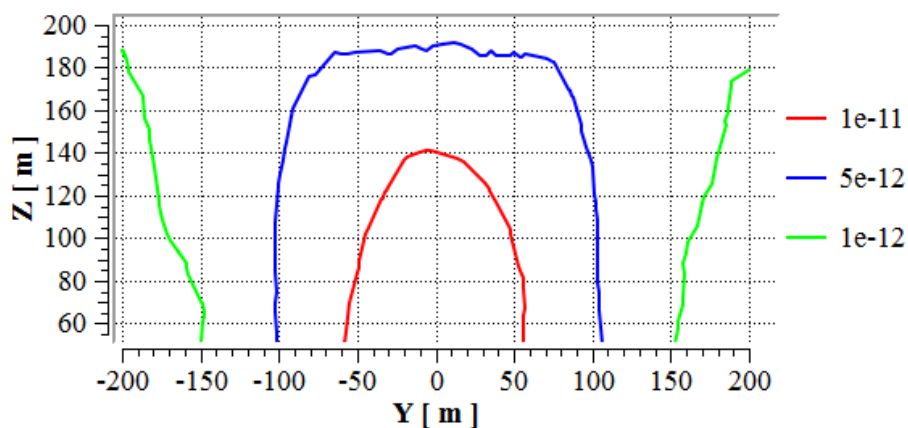


Figura 22 - Isoplefas no plano do ponto mais próximo (650 metros do ponto de liberação), na rodovia (modelo CFD).

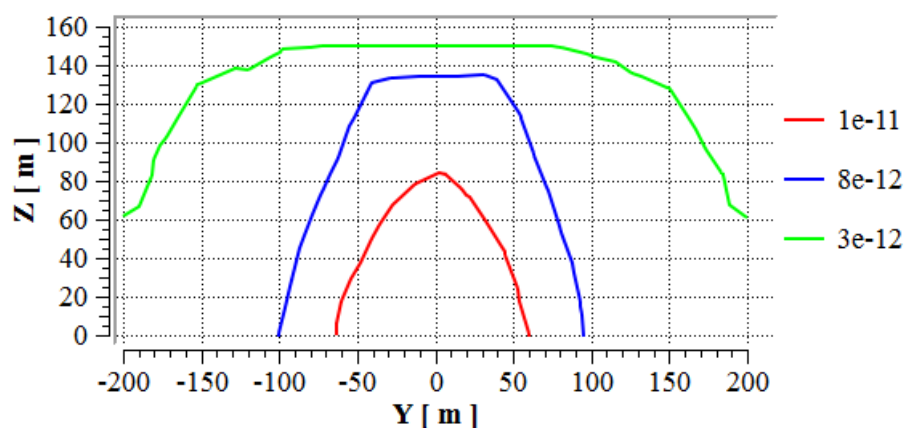


Figura 23 - Isopletas no plano do ponto ao norte (950 metros do ponto de liberação), na rodovia (modelo CFD).

Tabela 10 - Dose (em Sv) no ponto mais próximo (modelo gaussiano).

Embalado	Faixa etária (anos)					
	<1	1-2	2-7	7-12	12-17	>17
RP1	$3,44 \times 10^{-5}$	$3,18 \times 10^{-5}$	$5,28 \times 10^{-5}$	$7,32 \times 10^{-5}$	$5,95 \times 10^{-5}$	$5,49 \times 10^{-5}$
RP2	$5,89 \times 10^{-6}$	$5,35 \times 10^{-6}$	$9,71 \times 10^{-6}$	$1,43 \times 10^{-5}$	$1,24 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$
RC2	$1,6 \times 10^{-7}$	$1,47 \times 10^{-7}$	$2,63 \times 10^{-7}$	$3,84 \times 10^{-7}$	$3,29 \times 10^{-7}$	$3,15 \times 10^{-7}$
<i>Liner</i>	$1,91 \times 10^{-7}$	$1,77 \times 10^{-7}$	$2,93 \times 10^{-7}$	$4,06 \times 10^{-6}$	$3,3 \times 10^{-7}$	$3,05 \times 10^{-7}$

Tabela 11 - Dose (em Sv) no ponto mais próximo (modelo CFD).

Embalado	Faixa etária (anos)					
	<1	1-2	2-7	7-12	12-17	>17
RP1	$3,57 \times 10^{-9}$	$3,3 \times 10^{-9}$	$5,48 \times 10^{-9}$	$7,6 \times 10^{-9}$	$6,18 \times 10^{-9}$	$5,71 \times 10^{-9}$
RP2	$6,12 \times 10^{-10}$	$5,56 \times 10^{-10}$	$1,01 \times 10^{-9}$	$1,49 \times 10^{-9}$	$1,29 \times 10^{-9}$	$1,25 \times 10^{-9}$
RC2	$1,66 \times 10^{-11}$	$1,53 \times 10^{-11}$	$2,73 \times 10^{-11}$	$3,99 \times 10^{-11}$	$3,42 \times 10^{-11}$	$3,27 \times 10^{-11}$
<i>Liner</i>	$1,98 \times 10^{-11}$	$1,83 \times 10^{-11}$	$3,04 \times 10^{-11}$	$4,22 \times 10^{-11}$	$3,43 \times 10^{-11}$	$3,17 \times 10^{-11}$



Tabela 12 - Dose (em Sv) no ponto ao norte (modelo gaussiano).

Embalado	Faixa etária (ano)					
	<1	1-2	2-7	7-12	12-17	>17
RP1	$1,34 \times 10^{-5}$	$1,24 \times 10^{-5}$	$2,05 \times 10^{-5}$	$2,85 \times 10^{-5}$	$2,32 \times 10^{-5}$	$2,14 \times 10^{-5}$
RP2	$2,29 \times 10^{-6}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$3,78 \times 10^{-6}$	$5,58 \times 10^{-6}$	$4,84 \times 10^{-6}$	$4,69 \times 10^{-6}$
RC2	$6,22 \times 10^{-8}$	$5,73 \times 10^{-8}$	$1,02 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,28 \times 10^{-7}$	$1,23 \times 10^{-7}$
<i>Liner</i>	$7,44 \times 10^{-8}$	$6,88 \times 10^{-8}$	$1,14 \times 10^{-7}$	$1,58 \times 10^{-7}$	$1,29 \times 10^{-7}$	$1,19 \times 10^{-7}$

Tabela 13 - Dose (em Sv) no ponto ao norte (modelo CFD).

Embalado	Faixa etária (anos)					
	<1	1-2	2-7	7-12	12-17	>17
RP1	$3,01 \times 10^{-9}$	$2,87 \times 10^{-9}$	$4,76 \times 10^{-9}$	$6,6 \times 10^{-9}$	$5,37 \times 10^{-9}$	$4,95 \times 10^{-9}$
RP2	$5,31 \times 10^{-10}$	$4,82 \times 10^{-10}$	$8,76 \times 10^{-10}$	$1,29 \times 10^{-9}$	$1,12 \times 10^{-9}$	$1,09 \times 10^{-9}$
RC2	$1,44 \times 10^{-11}$	$1,33 \times 10^{-11}$	$2,37 \times 10^{-11}$	$3,46 \times 10^{-11}$	$2,97 \times 10^{-11}$	$2,84 \times 10^{-11}$
<i>Liner</i>	$1,72 \times 10^{-11}$	$1,59 \times 10^{-11}$	$2,64 \times 10^{-11}$	$3,66 \times 10^{-11}$	$2,98 \times 10^{-11}$	$2,75 \times 10^{-11}$

Os parâmetros não lineares utilizados nos modelos deste trabalho estão no cálculo da dispersão da nuvem. Uma vez encontrada a concentração, os valores das doses variam linearmente de acordo com os coeficientes de conversão utilizados, fração de cada radionuclídeo e taxas de respiração de cada faixa etária. A combinação destes fatores forneceu uma maior dose ao grupo de 7 a 12 anos para a queda do tambor contendo resina do primário de Angra 1, igual a  $7,32 \cdot 10^{-2}$  mSv. Este valor representa menos de 0,03% da dose estipulada para zona de exclusão devido a acidentes (CNEN, 1969).

A contribuição dos principais radionuclídeos para a dose pode ser vista na Figura 22. O *liner* e o tambor contendo resina do primário de Angra 1 possuem frações iguais de cada radionuclídeo e, portanto, para ambos o  $^{137}\text{Cs}$  é responsável por 56,5% da dose total, seguido do  $^{131}\text{I}$  (17,1%), o  $^{60}\text{Co}$  (9,4%), o  $^{58}\text{Co}$  (7,8%) e o  $^{134}\text{Cs}$  (6,8%). No tambor contendo resina do primário de Angra 2, o  $^{137}\text{Cs}$  novamente é o maior responsável pela

dose, correspondendo a 41,3% do total, seguido do  $^{137m}\text{Ba}$  (39,2%)<sup>4</sup> e do  $^{60}\text{Co}$  (9,3%). Por último, observa-se que para o tambor contendo rejeitos compactados (roupas, luvas, etc.) a principal contribuição é do radionuclídeo  $^{60}\text{Co}$  (62,8%), seguido do  $^{137}\text{Cs}$  (29,9%).

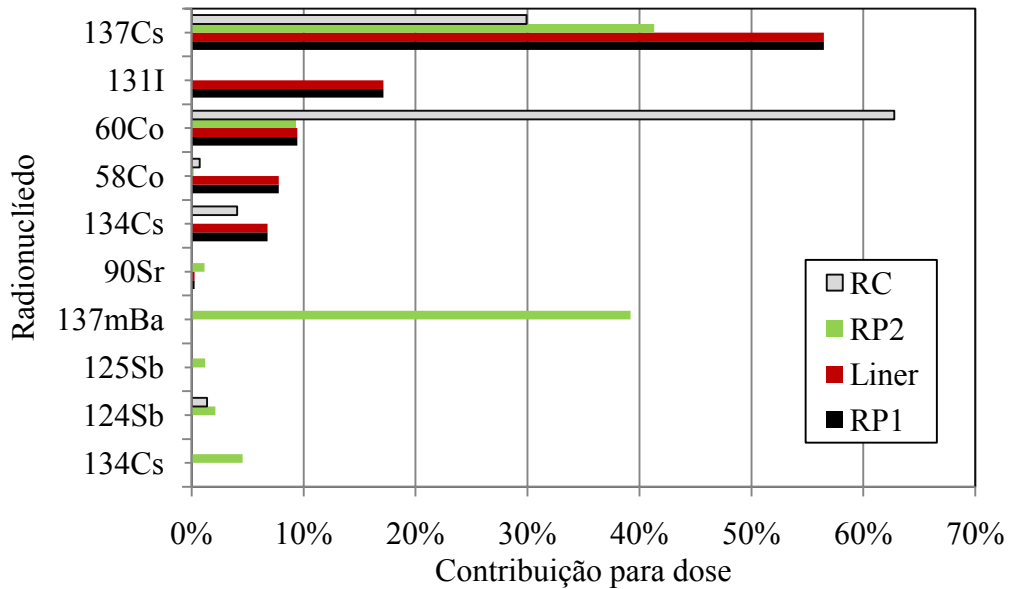


Figura 24 - Contribuição de cada radionuclídeo no valor final da dose.

## 6.1 Análises de sensibilidade

Alguns parâmetros utilizados ao longo do modelo possuem incertezas associadas que não foram consideradas. Por exemplo, para a simulação da dispersão atmosférica e cálculo da dose, foram consideradas a velocidade média do vento e a classe de estabilidade da região frequentes. A fim de avaliar qual seria o pior caso, ou seja, aquele com a maior dose, esta seção apresenta uma análise de sensibilidade de alguns parâmetros.

Como discutido anteriormente, uma vez calculada a concentração, a maior dose é encontrada pela multiplicação de fatores lineares, tais como os coeficientes de dose, taxa de respiração, etc. Desta forma, encontrada a concentração no ponto de interesse, o grupo que receberá a maior dose será sempre de crianças de 7 a 12 anos devido à queda do embalado contendo resina do primário de Angra 1. Fixando-se estes dois parâmetros,

<sup>4</sup> O  $^{137}\text{Ba}^*$  é proveniente do decaimento beta do  $^{137}\text{Cs}$  e aparece discriminado apenas no caso do tambor contendo resina do primário de Angra 2. Os coeficientes de dose usados foram os mesmos para o  $^{137}\text{Cs}$ .

as Figuras 25-26 mostram a variação da dose com a velocidade do vento e categoria de estabilidade, nos pontos mais próximo e ao norte, respectivamente.

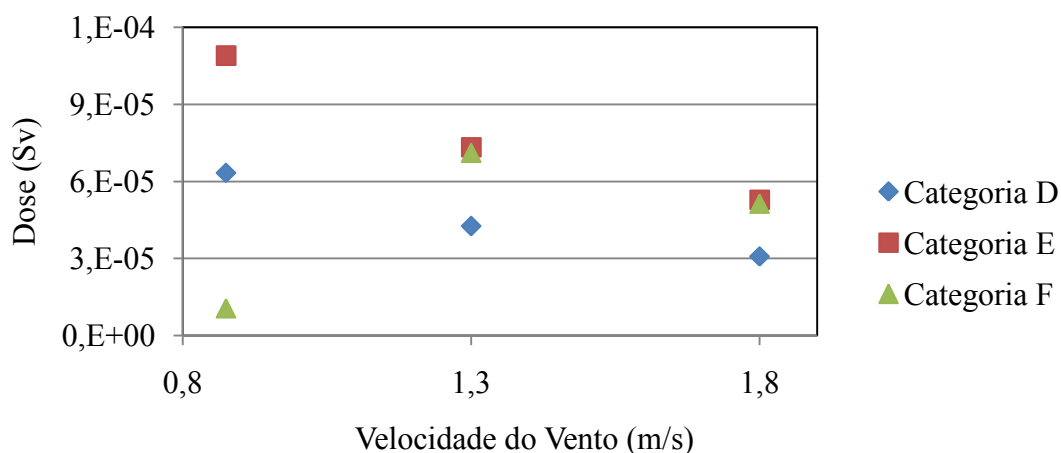


Figura 25 - Variação da dose com a velocidade do vento e categoria de estabilidade. Parâmetros fixos: ponto mais próximo (local), queda do embalado RP1(termo fonte), crianças de 7 a 12 anos (maior dose).

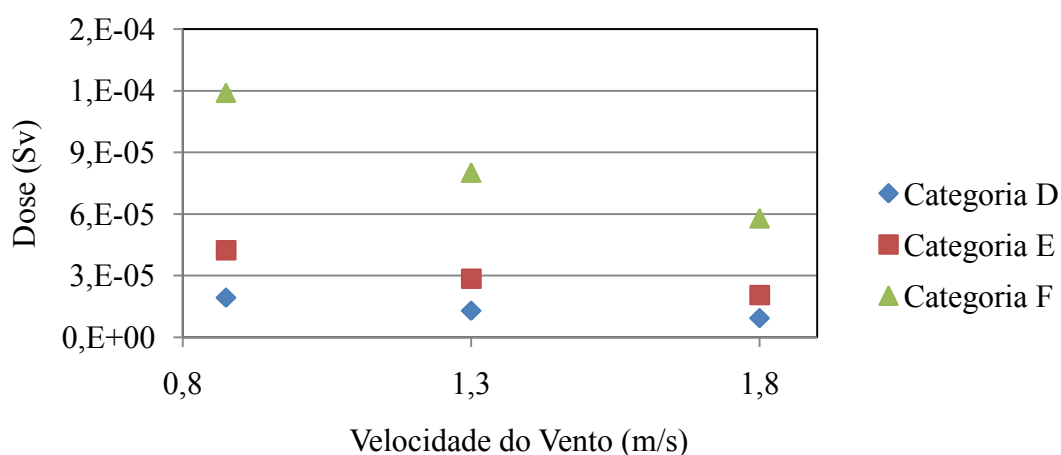


Figura 26 - Variação da dose com a velocidade do vento e categoria de estabilidade. Parâmetros fixos: ponto ao norte (local), queda do embalado RP1(termo fonte), crianças de 7 a 12 anos (maior dose).

A Figura 25 mostra que a categoria de estabilidade E fornece a menor dose para velocidades de ventos mais lentas, igual a 0,11 mSv. Isso ocorre, porque, como o ponto de dose está acima do ponto de liberação, considerou-se a concentração na altura do solo de acordo com o guia regulador NRC (1983). Se a dose fosse encontrada na altura de liberação, como é o caso da Figura 26 para o ponto ao norte, a categoria de estabilidade F forneceria a menor dose para ventos menores. Estes comportamentos são

facilmente compreendidos conhecendo-se os coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford, mostrados no Apêndice II.

A fração de radioatividade liberada devido à queda do embalado e que entra em suspensão com o ar, levando à formação da nuvem radioativa, é um fator linear no modelo e a dose final varia proporcionalmente com a variação desta fração, como ilustrado na Figura 27. Esta Figura mostra a faixa de variação da dose para valores possíveis da fração liberada.

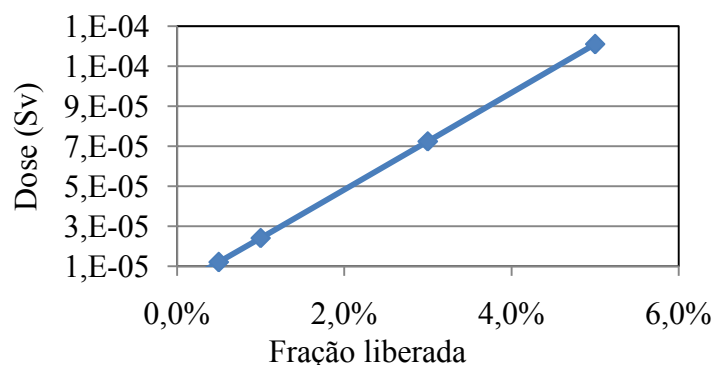


Figura 27 - Faixa de dose com fração de radioatividade liberada. Parâmetros fixos: ponto mais próximo (local), queda do embalado RP1 (atividade total), crianças de 7 a 12 anos (maior dose), categoria de estabilidade E e velocidade do vento igual a 1,3 m/s.

No modelo CFD utilizou-se um valor da difusividade cinemática igual a  $10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ . Como o valor da concentração utilizado está na direção do vento, este parâmetro não influencia muito no resultado final, como mostrada na Figura 28. Por outro lado, a difusividade cinemática vai atuar nas direções, onde o movimento advectivo não é preponderante, ou seja, nas direções perpendiculares à velocidade do vento.

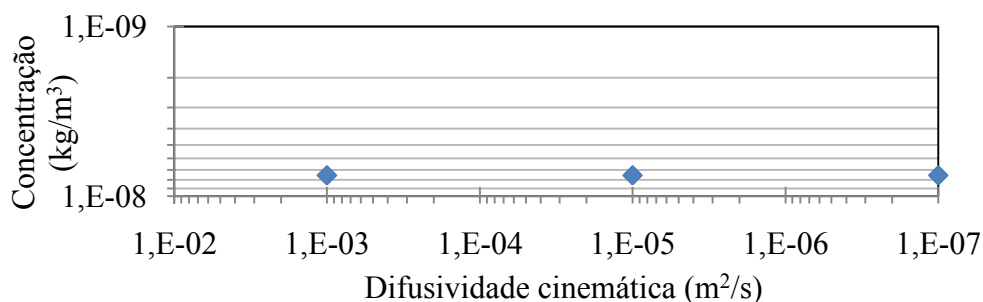


Figura 28 - Variação da concentração no ponto mais próximo com a difusividade cinemática usada no modelo CFD.

## ***Capítulo 7 Conclusões***

Este trabalho atende à proposta inicial junto à Eletrobrás Termonuclear S.A. de investigar o cenário de queda de embalado no Prédio de Monitoração do CGR através do modelo gaussiano de dispersão atmosférica, como indicado em documentos internacionais. O uso da fluidodinâmica computacional para o cálculo da dispersão atmosférica foi uma ferramenta adicional que permitiu uma simulação mais realista das condições do terreno e mostrou a capacidade dessa ferramenta de modelar tais problemas de dispersão. O uso das duas ferramentas tenta mostrar a importância de realizar estudos através da fluidodinâmica computacional para cálculos de dispersão, a fim de obter resultados menos conservadores, em comparação ao modelo gaussiano e, conseqüentemente, levando a medidas de proteção menos conservadoras.

O perfil do vento e as categorias de estabilidade da região da CNAAA foram analisados do período de jan/2000 a dez/2008 e os valores mais frequentes foram utilizados nos modelos. Muitas variáveis ainda podem ser consideradas nos dois modelos para torná-los mais próximos do problema real, como gradiente de velocidade e temperatura, altura da camada limite atmosférica, mecanismos de deposição, liberação dependente do tempo, rugosidade do terreno e outras condições de turbulência. Entretanto, o modelo gaussiano é limitado na faixa de aplicações e não prevê bons resultados próximo à liberação e para terrenos complexos. Além disso, este último modelo depende dos coeficientes de dispersão que foram obtidos experimentalmente para condições bem determinadas, que muitas vezes não se aplicam ao problema real. A CFD, por outro lado, permite uma variedade de considerações nestes aspectos e, por isso, está sendo cada vez mais usada para cálculos de dispersão de poluentes. Porém, para poder concluir qual modelo é o mais adequado seriam necessárias análises mais detalhadas e dados experimentais da região.

Com as concentrações encontradas pelos dois modelos de dispersão, calculou-se a dose devida à cada radionuclídeo proveniente da liberação de 3% de atividade inicial em quatro tipos de embalados distintos, considerando seis grupos de faixa etária. A maior dose encontrada foi para crianças de 7 a 12 anos devido à queda do tambor contendo resina do primário de Angra 1, igual a  $7,32 \times 10^{-2}$  mSv. Este valor representa apenas 0,029% da dose estipulada para a zona de exclusão devido à acidentes (CNEN, 1969). Análises de sensibilidade de alguns parâmetros realizadas mostraram que a dose não

ultrapassa 0,044% (0,11 mSv) deste limite no indivíduo do público para as piores condições de vento e estabilidade.

Recomendações deste trabalho são o desenvolvimento de um modelo mais realista com o uso da CFD; uso de outros modelos de turbulência na CDF; avaliação de outros fatores mencionados acima nos modelos de dispersão; e avaliação de outros cenários de dispersão atmosférica.

## Referências

- Ahn, M. H., Lee K. J. e Choi, K. W., "Dose assessment on arbitrary accidents originating in the temporary storage facility for LILW management", **Progress in Nuclear Energy**, vol.52, pp.206-213, 2010a.
- Ahn, M. H., Lee, K. J. e Choi, K. W., "Disposal concept for LILW in Korea: Characterization methodology and the disposal priority", **Progress in Nuclear Energy**, vol.51, pp.327-333, 2009.
- Ahn, M. H., Lee, K. J. e Choi, K. W., "Establishment of risk-based accident scenarios using the master logic diagram related to LILW management in the temporary storage facility", **Annals of Nuclear Energy**, vol.35, pp.2420-2435, 2008.
- Ahn, M. H., Lee, K. J. e Jeong, S. Y., "Development of integrated dose assessment program for accident analysis of LILW managed in temporary storage facility", **Progress in Nuclear Energy**, vol.52, pp.837-849, 2010b.
- AIEA, Development of Specification for Radioactive Waste Package, TECDOC 1515, Vienna, Austria, 2006.
- AIEA, Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Report Series No.19, Vienna, Austria, 2001.
- AIEA, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, Specific Safety Requirements No SSR-6, Vienna, Austria, 2012.
- Alves, A. S., Resina Exaurida. Análise Radiológica para a Resina Exaurida de Angra 2, Relatório ETN No. BN/2/0068/1170/08040, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- ANSYS, ANSYS Workbench™ vs. 14.0, <http://www.ansys.com/>, acessado fevereiro de 2013.
- CNEN, Coeficientes de Dose para Exposição do Público, Posição Regulatória 3.01 / 011, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- CNEN, Critérios de aceitação para deposição de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação, CNEN-NE-6.09, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- CNEN, Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica, CNEN-NE-3.01, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- CNEN, Instalações Radioativas, CNEN-NE-6.05, Rio de Janeiro, Brasil, 1985.
- CNEN, Normas para Escolha de Locais para Reatores de Potência, Resolução 09/69, Rio de Janeiro, Brasil, 1969.

CNEN, Transporte de Materiais Radioativos, CNEN-NE-5.01, Rio de Janeiro, Brasil, 1988.

Crowl, D. A. e Louvar, J. F., **Chemical Process Safety**, 3ª edição, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2011.

Dias, W. B., Angra 2: Manual de Controle Radiológico do Meio Ambiente - MCRMA, Relatório Técnico ETN CP/2/1170/000001, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency), AERMOD - Latest Features and Evaluation Results, EPA-454/R-03-003, EUA, 2003.

EPA, [http://http://www.epa.gov/scram001/dispersion\\_alt.htm](http://www.epa.gov/scram001/dispersion_alt.htm), acessado em fevereiro de 2013.

ETN, Angra 1, Final Safety Analysis Report, Rev. 34, Rio de Janeiro, Brasil, 2005a.

ETN, Angra 2, Final Safety Analysis Report, Rev. 11, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

ETN, Banco de Dados de Rejeitos de Angra, – REJAN, Angra dos Reis, Brasil, 2005b.

ETN, Estudo de Impacto Ambiental - EIA - Unidade III do DIRR/CNAAA, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

ETN, Prédio de Monitoração - Arranjo Geral - Plantas, UE MON 000034, Rev. 0, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

ETN, Prédio de Monitoração do Centro de Gerenciamento de Rejeitos - Memorial Descritivo / Bases de Projeto / Caracterização Ambiental, BP/03001, Rev.1, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

Ferziger, J. H. e Peri, M., **Computational Methods for Fluid Dynamics**, Springer, Berlin, Alemanha, 1996.

Mazzoldi, A., Hill, T. e Colls, J. J., "CFD and Gaussian atmospheric dispersion models: A comparison for leak from carbon dioxide transportation and storage facilities", **Atmospheric Environment**, vol. 42, pp.8046-8054, 2008.

Nirex (United Kingdom Nirex Ltd), Generic Repository Studies, Generic Transport Safety Assessment, Volume 1 - Main Report, Nirex Report N/078, Oxfordshire, Reino Unido, 2003a.

Nirex (United Kingdom Nirex Ltd), Generic Repository Studies, Generic Transport Safety Assessment, Volume 2 - Main Report, Nirex Report N/078, Oxfordshire, Reino Unido, 2003b.

NRC (US Nuclear Regulatory Commission), Atmospheric Dispersion Models for Potential Accident Consequence Assessments at Nuclear Power Plants, Regulatory Guide 1.145, Washington, EUA, 1983.



- NRC, Computer Program for the Meteorological Evaluation of Routine Effluent Release at Nuclear Power Plants, NUREG/CR-2919, Washington, EUA, 1982.
- NRC, Standard Review Plan for Transportation Packages for Radioactive Material, NUREG-1609, Washington, 1999.
- Oliveira Jr., J. F., Pimentel, L. C. G. e Landau, L., "Critérios de estabilidade atmosférica para a região da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, Angra dos Reis - RJ", **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol.25, no. 2, pp.270-285, 2010.
- Riddle, A., Carruthers, D., Sharpe, A., McHugh, C. e Stoker, J., "Comparisons between FLUENT and ADMS for atmospheric dispersion modeling", **Atmospheric Environmental**, vol.38, pp.1029-1038, 2004.
- Sampaio, P. A. B., Junior, M. A. G. e Lapa, C. M. F., "A CDF approach to the atmospheric dispersion of radionuclides in the vicinity of NPPS", **Nuclear Engineering and Design**, vol.238, pp.250-273, 2008.
- Seinfeld, J. H. e Pandis, S. N., **Atmospheric Chemistry and Physics, From Air Pollution to Climate Change**, 2ª ed., New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- Till, J. E. e Grogan, H. A., **Radiological Risk Assessment and Environmental Analysis**, New York, Oxford University Press, 2008.
- Weblakes, <http://www.weblakes.com>, acessado em dezembro de 2012.
- Wolfram, <http://www.wolfram.com/mathematica>, acessado em dezembro de 2012.

## *Apêndice I*

*Programa Rosa dos Ventos*  
*(em linguagem Fortran 90)*

```

program rosa_dos_ventos

character*17 arquivo(9,12) !arquivos de dados de 9 anos (12 meses
cada)

integer ano !2000 - 2008
integer mes !Jan - Dez
integer u    !variável auxiliar para identificar a unidade do arquivo

integer direcao          !16 direcoes do vento
integer Cvento          !12 classes de velocidade
integer Cestabilidade   !7 classes de estabilidade (A,B,C,D,E,F,G)

real CALMA(9,12,7)      !Horas de calma para 9 anos, 12 meses e 7
classes de estabilidade
real P(9,12,16,7,12)    !Horas de vento para 9 anos, 12 meses, 16
direções de vento, 7 classes de estabilidade e 12 classes de vento

real Classe(7)          !Frequência das classes de estabilidade
real Calma_Classe(7)    !Frequência de calma por classe de estabilidade
real Vento(16,12)       !Frequência de vento em todo período
real Vento_Classe(16,7,12) !Frequência de vento em todo período por
classe de estabilidade

real soma, soma1 !variáveis auxiliares

!-----Abrindo os arquivos-----!
arquivo(1,1) = "..\ANO00\DT1JAN00"
arquivo(1,2) = "..\ANO00\DT1FEV00"
arquivo(1,3) = "..\ANO00\DT1MAR00"
.
.
.
arquivo(9,10) = "..\ANO08\DT1OUT08"
arquivo(9,11) = "..\ANO08\DT1NOV08"
arquivo(9,12) = "..\ANO08\DT1DEZ08"

do ano = 1, 9
    u = 20*ano
    do mes = 1, 12
        open(unit=mes+u, file=arquivo(ano,mes), mode="read")

```

```

        enddo
    enddo
!-----!

!-----Lendo os arquivos-----!

do ano = 1, 9
    u = 20*ano
    do mes = 1, 12

        !Número de horas de calma para cada classe de estabilidade
        read(mes + u,*) (CALMA(ano, mes, Cestabilidade),
Cestabilidade = 1,7)

        !Número de horas durante as quais o vento soprou na direção
"direcao"

        ! com velocidade dentro da classe de velocidade "Cvento"
        ! sob condições de estabilidade dentro da classe de
estabilidade "Cestabilidade"
        do Cestabilidade = 1,7
            do Cvento = 1, 12
                read(mes+u,"(<16>(F5.0))")
(P(ano,mes,direcao,Cestabilidade,Cvento),direcao = 1,16)
            enddo
        enddo
    enddo
enddo
!-----!

!-----Fechando os arquivos-----!

do ano = 1, 9
    u = 20*ano
    do mes = 1, 12
        close(mes + u)
    enddo
enddo
!-----!

!-----Verificando as classes de estabilidade mais frequentes-----!
!-----e período de calma por classe de estabilidade-----!

do ano = 1, 9

```

```

do mes = 1, 12
    Calma_Classe(:) = Calma_Classe(:) + Calma(ano,mes,:)
    do direcao = 1, 16
        do Cvento = 1, 12
            Classe(:) = Classe(:) +
P(ano,mes,direcao,:,Cvento)
            enddo
        enddo
    enddo
enddo

soma = 0
somal = 0
do i = 1, 7
    soma = soma + Classe(i)
    somal = somal + Calma_Classe(i)
enddo

open(unit=200,file="Classes.txt", mode="write")

write(200,"(<7>A12)") "A","B", "C","D", "E", "F", "G"
write(200,"(<7>(2x,F10.9))") (Classe(i)/soma, i=1,7)

write(200,"(/,/ ,A12)") "Calmas"
write(200,"(<7>A12)") "A","B", "C","D", "E", "F", "G"
write(200,"(<7>(2x,F10.9))") (Calma_Classe(i)/somal, i=1,7)

close(200)
!-----!

!-----Verificando velocidade e direção do vento-----!
do ano = 1,9
    do mes = 1,12
        Vento_Classe(:,:,:) = Vento_Classe(:,:,:) +
P(ano,mes,:,:)
        do Cestabilidade = 1,7
            Vento(:,:) = Vento(:,:) +
P(ano,mes,:,Cestabilidade,:)
            enddo
        enddo
    enddo
enddo

```

```

open(unit=210,file="Vento_Dir_Classe.txt",mode="write")

do direcao = 1, 16
    write(210,"(<12>F10.0)") (Vento(direcao,Cvento), Cvento=1,12)
enddo

write(210,"(/,/,A10)") "Classe D"
do direcao = 1, 16
    write(210,"(<12>F10.0)") (Vento_Classe(direcao,4,Cvento),
Cvento=1,12)
enddo

write(210,"(/,/,A10)") "Classe E"
do direcao = 1, 16
    write(210,"(<12>F10.0)") (Vento_Classe(direcao,5,Cvento),
Cvento=1,12)
enddo

write(210,"(/,/,A10)") "Classe F"
do direcao = 1, 16
    write(210,"(<12>F10.0)") (Vento_Classe(direcao,6,Cvento),
Cvento=1,12)
enddo

close(210)
!-----!
pause
end program rosa_dos_ventos

```

## *Apêndice II*

### *Programa Modelo Pasquill-Gifford\** *(Mathematica 7.0)*

*\*Algumas linhas foram ocultadas propositalmente.*

# Projeto Final - Departamento de Engenharia Nuclear / UFRJ

## *Simulação de Queda dos Embalos contendo Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Nível de Radiação*

Juliana Pacheco Duarte

Orientador : Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

---

### Dados dos embalados

#### ■ Atividades dos embalados

Número de radionuclídeos de cada embalado:

```
In[1]:= NumeroRPangra2 = 14;  
NumeroRPangra1 = 22;  
NumeroRCangra2 = 8;  
NumeroLinerangra1 = 22;
```

- Tambor de 200 litros com matriz de betume contendo Resina do Primário de Angra 2 - Atividades de projeto (Bq) (ETN, 2005a,b)
  - Tambor de 200 litros com matriz de cimento contendo Resina do Primário de Angra 1 - Atividades de projeto (Bq) (ETN, 2012)
  - Tambor de 200 litros contendo Rejeito Compactado de Angra 2 - Atividades de projeto (Bq) (Alves, 2008)
  - "Liner" (ETN, 2005a)
- 

### Coefficientes para cálculo da Dose

#### ■ Taxa de inalação (Dias, 2002)

Out[14]//TableForm=

Faixa etária	anos	Taxa de inalação	m <sup>3</sup> ano
<=1		1400	
1 a 2		1400	
2 a 7		3700	
7 a 12		8000	
12 a 17		8000	
> 17		8400	

- Coeficientes de dose para exposição externa de adultos, para diversas geometrias de exposição ambiental, no caso de imersão em nuvem radioativa (Sv/h por Bq/m<sup>3</sup>) (CNEN, 2005)
- Para os isótopos da resina do primário de Angra 2

Out[16]//TableForm=

Radionuclídeo	G	Sv h por Bq m <sup>3</sup>
---------------	---	----------------------------



54 Mn	$1.38 \times 10^{-10}$
58 Co	$1.6 \times 10^{-10}$
60 Co	$4.28 \times 10^{-10}$
63 Ni	$1. \times 10^{-10}$
65 Zn	$9.79 \times 10^{-11}$
90 Sr	$3.54 \times 10^{-13}$
90 Y	$2.85 \times 10^{-12}$
110 mAg	$4.57 \times 10^{-10}$
122 Sb	$7.27 \times 10^{-11}$
124 Sb	$3.1 \times 10^{-10}$
125 Sb	$6.73 \times 10^{-11}$
134 Cs	$2.54 \times 10^{-10}$
137 Cs	$3.34 \times 10^{-13}$
137 mBa	$9.68 \times 10^{-11}$

■ **Para isótopos da resina do primário de Angra 1**

Out[18]/TableForm=

<u>Radionuclídeo</u>	<u>G Sv h por Bq m<sup>3</sup></u>
54 Mn	$1.38 \times 10^{-10}$
59 Fe	$2.02 \times 10^{-10}$
58 Co	$1.6 \times 10^{-10}$
60 Co	$4.28 \times 10^{-10}$
89 Sr	$1.57 \times 10^{-12}$
90 Sr	$3.54 \times 10^{-13}$
90 Y	$2.85 \times 10^{-12}$
91 Y	$2.24 \times 10^{-12}$
95 Zr	$1.21 \times 10^{-10}$
95 Nb	$1.26 \times 10^{-10}$
99 Mo	$2.52 \times 10^{-11}$
131 Iodo	$6.08 \times 10^{-11}$
133 Iodo	$9.94 \times 10^{-11}$
135 Iodo	$2.71 \times 10^{-10}$
132 Te	$3.36 \times 10^{-11}$
134 Cs	$2.54 \times 10^{-10}$
136 Cs	$3.58 \times 10^{-10}$
137 Cs	$3.34 \times 10^{-13}$
140 Ba	$2.91 \times 10^{-11}$
140 La	$4. \times 10^{-10}$
144 Ce	$2.75 \times 10^{-12}$
144 PR	$9.54 \times 10^{-12}$

■ **Tambor de 200 litros contendo Rejeito Compactado de Angra 2**

Out[20]/TableForm=

<u>Radionuclídeo</u>	<u>G Sv h por Bq m<sup>3</sup></u>
58 Co	$1.6 \times 10^{-10}$
60 Co	$4.28 \times 10^{-10}$
134 Cs	$2.54 \times 10^{-10}$
137 Cs	$3.34 \times 10^{-13}$
54 Mn	$1.38 \times 10^{-10}$
124 Sb	$3.1 \times 10^{-10}$
59 Fe	$2.02 \times 10^{-10}$
95 Zr	$1.21 \times 10^{-10}$

**Para isótopos da resina do primário de Angra 1 (LINER)**

In[21]= GLinerangra1 = GRPangra1;

■ **Dose efetiva comprometida por unidade de incorporação via inalação em (Sv/Bq) (CNEN, 2005)**

■ **Para os isótopos da resina do primário de Angra 2**

Out[24]/TableForm=

Radionuclídeo	<=1a	1 a 2	2 a 7	7 a 12	12 a 17	>17
54 Mn	$7.5 \times 10^{-9}$	$6.2 \times 10^{-9}$	$3.8 \times 10^{-9}$	$2.4 \times 10^{-9}$	$1.9 \times 10^{-9}$	$1.5 \times 10^{-9}$
58 Co	$9. \times 10^{-9}$	$7.5 \times 10^{-9}$	$4.5 \times 10^{-9}$	$3.1 \times 10^{-9}$	$2.6 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-9}$
60 Co	$9.2 \times 10^{-8}$	$8.6 \times 10^{-8}$	$5.9 \times 10^{-8}$	$4. \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-8}$	$3.1 \times 10^{-8}$
63 Ni	$4.8 \times 10^{-9}$	$4.3 \times 10^{-9}$	$2.7 \times 10^{-9}$	$1.7 \times 10^{-9}$	$1.3 \times 10^{-9}$	$1.3 \times 10^{-9}$
65 Zn	$1.5 \times 10^{-8}$	$1. \times 10^{-8}$	$5.7 \times 10^{-9}$	$3.8 \times 10^{-9}$	$2.5 \times 10^{-9}$	$2.2 \times 10^{-9}$
90 Sr	$4.2 \times 10^{-7}$	$4. \times 10^{-7}$	$2.7 \times 10^{-7}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.6 \times 10^{-7}$	$1.6 \times 10^{-7}$
90 Y	$1.3 \times 10^{-8}$	$8.8 \times 10^{-9}$	$4.2 \times 10^{-9}$	$2.7 \times 10^{-9}$	$1.8 \times 10^{-9}$	$1.5 \times 10^{-9}$
110 mAg	$4.6 \times 10^{-8}$	$4.1 \times 10^{-8}$	$2.6 \times 10^{-8}$	$1.8 \times 10^{-8}$	$1.5 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^{-8}$
122 Sb	$8.8 \times 10^{-9}$	$6.1 \times 10^{-9}$	$3. \times 10^{-9}$	$2. \times 10^{-9}$	$1.4 \times 10^{-9}$	$1.1 \times 10^{-9}$
124 Sb	$3.9 \times 10^{-8}$	$3.1 \times 10^{-8}$	$1.8 \times 10^{-8}$	$1.3 \times 10^{-8}$	$1. \times 10^{-8}$	$8.6 \times 10^{-9}$
125 Sb	$4.2 \times 10^{-8}$	$3.8 \times 10^{-8}$	$2.4 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-8}$	$1.4 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^{-8}$
134 Cs	$7. \times 10^{-8}$	$6.3 \times 10^{-8}$	$4.1 \times 10^{-8}$	$2.8 \times 10^{-8}$	$2.3 \times 10^{-8}$	$2. \times 10^{-8}$
137 Cs	$1.1 \times 10^{-7}$	$1. \times 10^{-7}$	$7. \times 10^{-8}$	$4.8 \times 10^{-8}$	$4.2 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-8}$
137 mBa	$1.1 \times 10^{-7}$	$1. \times 10^{-7}$	$7. \times 10^{-8}$	$4.8 \times 10^{-8}$	$4.2 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-8}$

■ **Para isótopos da resina do primário de Angra 1**

Out[26]/TableForm=

Radionuclídeo	<=1a	1 a 2	2 a 7	7 a 12	12 a 17	>17
54 Mn	$7.5 \times 10^{-9}$	$6.2 \times 10^{-9}$	$3.8 \times 10^{-9}$	$2.4 \times 10^{-9}$	$1.9 \times 10^{-9}$	$1.5 \times 10^{-9}$
59 Fe	$1.8 \times 10^{-8}$	$1.3 \times 10^{-8}$	$8.1 \times 10^{-9}$	$5.8 \times 10^{-9}$	$5.1 \times 10^{-9}$	$4. \times 10^{-9}$
58 Co	$9. \times 10^{-9}$	$7.5 \times 10^{-9}$	$4.5 \times 10^{-9}$	$3.1 \times 10^{-9}$	$2.6 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-9}$
60 Co	$9.2 \times 10^{-8}$	$8.6 \times 10^{-8}$	$5.9 \times 10^{-8}$	$4. \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-8}$	$3.1 \times 10^{-8}$
89 Sr	$3.9 \times 10^{-8}$	$3. \times 10^{-8}$	$1.7 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^{-8}$	$9.3 \times 10^{-9}$	$7.9 \times 10^{-9}$
90 Sr	$4.2 \times 10^{-7}$	$4. \times 10^{-7}$	$2.7 \times 10^{-7}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.6 \times 10^{-7}$	$1.6 \times 10^{-7}$
90 Y	$1.3 \times 10^{-8}$	$8.8 \times 10^{-9}$	$4.2 \times 10^{-9}$	$2.7 \times 10^{-9}$	$1.8 \times 10^{-9}$	$1.5 \times 10^{-9}$
91 Y	$4.3 \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-8}$	$1.9 \times 10^{-8}$	$1.3 \times 10^{-8}$	$1. \times 10^{-8}$	$8.9 \times 10^{-9}$
95 Zr	$2.4 \times 10^{-8}$	$1.9 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^{-8}$	$8.3 \times 10^{-9}$	$7.3 \times 10^{-9}$	$5.9 \times 10^{-9}$
95 Nb	$7.7 \times 10^{-9}$	$5.9 \times 10^{-9}$	$3.6 \times 10^{-9}$	$2.5 \times 10^{-9}$	$2.2 \times 10^{-9}$	$1.8 \times 10^{-9}$
99 Mo	$6.9 \times 10^{-9}$	$4.8 \times 10^{-9}$	$2.4 \times 10^{-9}$	$1.7 \times 10^{-9}$	$1.2 \times 10^{-9}$	$9.9 \times 10^{-10}$
131 Iodo	$7.2 \times 10^{-8}$	$7.2 \times 10^{-8}$	$3.7 \times 10^{-8}$	$1.9 \times 10^{-8}$	$1.1 \times 10^{-8}$	$7.4 \times 10^{-9}$
133 Iodo	$1.9 \times 10^{-8}$	$1.8 \times 10^{-8}$	$8.3 \times 10^{-9}$	$3.8 \times 10^{-9}$	$2.2 \times 10^{-9}$	$1.5 \times 10^{-9}$
135 Iodo	$4.1 \times 10^{-9}$	$3.7 \times 10^{-9}$	$1.7 \times 10^{-9}$	$7.9 \times 10^{-10}$	$4.8 \times 10^{-10}$	$3.2 \times 10^{-10}$
132 Te	$2.2 \times 10^{-8}$	$1.8 \times 10^{-8}$	$8.5 \times 10^{-9}$	$4.2 \times 10^{-9}$	$2.6 \times 10^{-9}$	$2. \times 10^{-9}$
134 Cs	$7. \times 10^{-8}$	$6.3 \times 10^{-8}$	$4.1 \times 10^{-8}$	$2.8 \times 10^{-8}$	$2.3 \times 10^{-8}$	$2. \times 10^{-8}$
136 Cs	$1.5 \times 10^{-8}$	$1.1 \times 10^{-8}$	$6. \times 10^{-9}$	$4.1 \times 10^{-9}$	$3.5 \times 10^{-9}$	$2.8 \times 10^{-9}$
137 Cs	$1.1 \times 10^{-7}$	$1. \times 10^{-7}$	$7. \times 10^{-8}$	$4.8 \times 10^{-8}$	$4.2 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-8}$
140 Ba	$2.9 \times 10^{-8}$	$2.2 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^{-8}$	$8.6 \times 10^{-9}$	$7.1 \times 10^{-9}$	$5.8 \times 10^{-9}$
140 La	$8.8 \times 10^{-9}$	$6.3 \times 10^{-9}$	$3.1 \times 10^{-9}$	$2. \times 10^{-9}$	$1.3 \times 10^{-9}$	$1.1 \times 10^{-9}$
144 Ce	$3.6 \times 10^{-7}$	$2.7 \times 10^{-7}$	$1.4 \times 10^{-7}$	$7.8 \times 10^{-8}$	$5.8 \times 10^{-8}$	$5.3 \times 10^{-8}$
144 PR	$1.9 \times 10^{-10}$	$1.2 \times 10^{-10}$	$5.2 \times 10^{-11}$	$3.4 \times 10^{-11}$	$2.1 \times 10^{-11}$	$1.8 \times 10^{-11}$

■ **Tambor de 200 litros contendo Rejeito Compactado de Angra 2**

Out[28]/TableForm=

Radionuclídeo	<=1a	1 a 2	2 a 7	7 a 12	12 a 17	>17
58 Co	$9. \times 10^{-9}$	$7.5 \times 10^{-9}$	$4.5 \times 10^{-9}$	$3.1 \times 10^{-9}$	$2.6 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-9}$
60 Co	$9.2 \times 10^{-8}$	$8.6 \times 10^{-8}$	$5.9 \times 10^{-8}$	$4. \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-8}$	$3.1 \times 10^{-8}$
134 Cs	$7. \times 10^{-8}$	$6.3 \times 10^{-8}$	$4.1 \times 10^{-8}$	$2.8 \times 10^{-8}$	$2.3 \times 10^{-8}$	$2. \times 10^{-8}$

137 Cs	$1.1 \times 10^{-7}$	$1. \times 10^{-7}$	$7. \times 10^{-8}$	$4.8 \times 10^{-8}$	$4.2 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-8}$
54 Mn	$7.5 \times 10^{-9}$	$6.2 \times 10^{-9}$	$3.8 \times 10^{-9}$	$2.4 \times 10^{-9}$	$1.9 \times 10^{-9}$	$1.5 \times 10^{-9}$
124 Sb	$3.9 \times 10^{-8}$	$3.1 \times 10^{-8}$	$1.8 \times 10^{-8}$	$1.3 \times 10^{-8}$	$1. \times 10^{-8}$	$8.6 \times 10^{-9}$
59 Fe	$1.7 \times 10^{-8}$	$1.3 \times 10^{-8}$	$8.1 \times 10^{-9}$	$5.8 \times 10^{-9}$	$5.1 \times 10^{-9}$	$4. \times 10^{-9}$
95 Zr	$2.4 \times 10^{-8}$	$1.9 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^{-8}$	$8.3 \times 10^{-9}$	$7.1 \times 10^{-9}$	$5.9 \times 10^{-9}$

■ Para isótopos da resina do primário de Angra 1 (LINER)

In[29]:= `InhLinerangra1 = InhRPangra1 ;`

### Modelo de Pasquill-Gifford (Crowl e Louvar, 2011)

■ Coeficientes de difusão lateral ( $\sigma_y$ ) e vertical ( $\sigma_z$ ), em metros

In[31]:

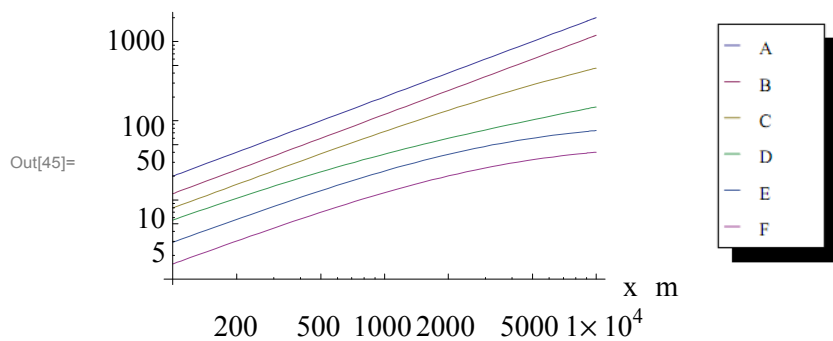
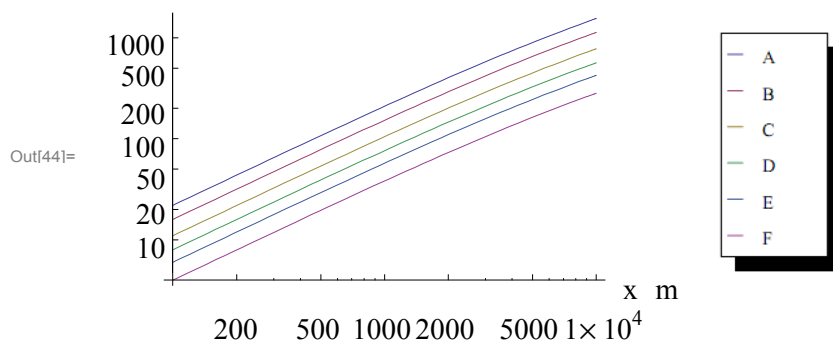
```

 $\sigma_y$ [CategoriaA,CampoAberto,x_] := 0.22x (1+0.0001x)^(-1./2)
 $\sigma_z$ [CategoriaA,CampoAberto,x_] := 0.20x
 $\sigma_y$ [CategoriaB,CampoAberto,x_] := 0.16x (1+0.0001x)^(-1./2)
 $\sigma_z$ [CategoriaB,CampoAberto,x_] := 0.12x
 $\sigma_y$ [CategoriaC,CampoAberto,x_] := 0.11x (1+0.0001x)^(-1./2)
 $\sigma_z$ [CategoriaC,CampoAberto,x_] := 0.08x (1+0.0002x)^(-1./2)
 $\sigma_y$ [CategoriaD,CampoAberto,x_] := 0.08x (1+0.0001x)^(-1./2)
 $\sigma_z$ [CategoriaD,CampoAberto,x_] := 0.06x (1+0.0015x)^(-1./2)
 $\sigma_y$ [CategoriaE,CampoAberto,x_] := 0.06x (1+0.0001x)^(-1./2)
 $\sigma_z$ [CategoriaE,CampoAberto,x_] := 0.03x (1+0.0003x)^(-1.)
 $\sigma_y$ [CategoriaF,CampoAberto,x_] := 0.04x (1+0.0001x)^(-1./2)
 $\sigma_z$ [CategoriaF,CampoAberto,x_] := 0.016x (1+0.0003x)^(-1.)

```

■ Para liberação contínua (pluma)

Fórmulas recomendadas para  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  em condições de campo aberto  $10^2 < x < 10^4$  m



■ Concentração para liberação contínua

$$\ln[46]:= \chi[\text{Categoria\_local\_TaxaLiberacao\_AlturaLiberacao\_x\_y\_z\_VelocidadeVento}]:= \frac{\text{TaxaLiberacao}}{(2\pi\sigma_y[\text{Categoria\_local,x}]\sigma_z[\text{Categoria\_local,x}]\text{VelocidadeVento})} \text{Exp}\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y[\text{Categoria\_local,x}]}\right)^2\right] \times (\text{Exp}\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\text{AlturaLiberacao}}{\sigma_z[\text{Categoria\_local,x}]}\right)^2\right] + \text{Exp}\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+\text{AlturaLiberacao}}{\sigma_z[\text{Categoria\_local,x}]}\right)^2\right]);$$

## Cálculo da Dose

### ■ Massa de ar liberada contaminada (liberada em um ano)

$$\ln[47]:= \text{MassaAr TaxaLiberacao\_} := \text{TaxaLiberacao} * 60 * 60 * 24 * 365 * \text{kg}$$

### Exposição à radiação devido à imersão em nuvem radioativa (IAEA, 2001)

$$\text{Eim} = \text{CA} * \text{DFim} * \text{Of} * \text{Fc}$$

onde

Eim é a dose devido à imersão em nuvem radioativa (Sv)

CA é a concentração dos radionuclídeos no ar (Bq/m<sup>3</sup>)

DFim é o coeficiente de dose devido à imersão (Sv/a por Bq/m<sup>3</sup>)

Of é a fração do ano no qual o grupo crítico é exposto

Fc é o fator de correção para a faixa etária

$$\ln[48]:= \text{CA} [\text{concentracao\_}, \text{fracao\_}, \text{embalado\_}, \text{massaAr\_}] := \frac{\text{concentracao} * \text{fracao}}{\text{massaAr}} * \text{embalado} (* \text{DFim} = \text{G} * 365 * 24 *)$$

Of = 1;

$$\ln[50]:= \text{Eim} \text{concentracao\_}, \text{fracao\_}, \text{embalado\_}, \text{massaAr\_}, \text{G\_}, \text{FatorCorrecao\_} := \text{CA} \text{concentracao}, \text{fracao}, \text{embalado}, \text{massaAr} * \text{G} * 365 * 24 * \text{Of} * \text{FatorCorrecao}$$

### ■ Inalação de ar contaminado (IAEA, 2001)

$$\text{Einh} = \text{CA} * \text{Rinh} * \text{DFinh}$$

onde:

Einh é a dose devido a inalação (Sv)

CA é a concentração do radionuclídeo no ar (Bq/m<sup>3</sup>)

Rinh é a taxa de inalação (m<sup>3</sup>/a)

DFinh é o coeficiente de dose por inalação (Sv/Bq)

$$\ln[51]:= \text{Einh} [\text{concentracao\_}, \text{fracao\_}, \text{embalado\_}, \text{massaAr\_}, \text{Rinh\_}, \text{DFinh\_}] := \text{CA} [\text{concentracao}, \text{fracao}, \text{embalado}, \text{massaAr}] * \text{Rinh} * \text{DFinh}$$

### ■ Dose total

$$\ln[52]:= \text{Dose} [\text{concentracao\_}, \text{fracao\_}, \text{embalado\_}, \text{massaAr\_}, \text{G\_}, \text{Rinh\_}, \text{DFinh\_}, \text{FatorCorrecao\_}] := \text{Eim} [\text{concentracao}, \text{fracao}, \text{embalado}, \text{massaAr}, \text{G}, \text{FatorCorrecao}] + \text{Einh} [\text{concentracao}, \text{fracao}, \text{embalado}, \text{massaAr}, \text{Rinh}, \text{DFinh}]$$

---

## Resultados - Concentração

### ■ Gráficos

---

## Resultados - Doses

A dose total é a soma da contribuição de cada radionuclídeo e é calculada pela função abaixo, para variáveis de cada caso nas próximas subseções.

```
Sum[Dose[χ[Categoria, local, TaxaLiberacao, alturaLiberacao, dirx, diry, dirz, VelocidadeVento], fracao, embalado, MassaAr[TaxaLiberacao], GRPangral[[i, 2]], TaxaInalacao[grupo], InhRPangral[[i, grupo + 1]], FatorCorrecao], {i, 1, NumeroRPangral}]
```

com o grupo variando de 1 a 6

e embalado variando entre as atividades de cada tipo de embalado

### ■ Ponto mais próximo

#### ■ Modelo Gaussiano

Out[76]//ScientificForm=

	>=1	1 a 2	2 a 7	7 a 12	12 a 17	> 17
RP1	$3.44 \times 10^{-5}$	$3.18 \times 10^{-5}$	$5.28 \times 10^{-5}$	$7.32 \times 10^{-5}$	$5.95 \times 10^{-5}$	$5.49 \times 10^{-5}$
RP2	$5.89 \times 10^{-6}$	$5.35 \times 10^{-6}$	$9.71 \times 10^{-6}$	$1.43 \times 10^{-5}$	$1.24 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$
RC2	$1.6 \times 10^{-7}$	$1.47 \times 10^{-7}$	$2.63 \times 10^{-7}$	$3.84 \times 10^{-7}$	$3.29 \times 10^{-7}$	$3.15 \times 10^{-7}$
Liner	$1.91 \times 10^{-7}$	$1.77 \times 10^{-7}$	$2.93 \times 10^{-7}$	$4.06 \times 10^{-7}$	$3.3 \times 10^{-7}$	$3.05 \times 10^{-7}$

#### ■ Modelo CFD

Out[79]//ScientificForm=

	>=1	1 a 2	2 a 7	7 a 12	12 a 17	> 17
RP1	$3.57 \times 10^{-9}$	$3.3 \times 10^{-9}$	$5.48 \times 10^{-9}$	$7.6 \times 10^{-9}$	$6.18 \times 10^{-9}$	$5.71 \times 10^{-9}$
RP2	$6.12 \times 10^{-10}$	$5.56 \times 10^{-10}$	$1.01 \times 10^{-9}$	$1.49 \times 10^{-9}$	$1.29 \times 10^{-9}$	$1.25 \times 10^{-9}$
RC2	$1.66 \times 10^{-11}$	$1.53 \times 10^{-11}$	$2.73 \times 10^{-11}$	$3.99 \times 10^{-11}$	$3.42 \times 10^{-11}$	$3.27 \times 10^{-11}$
Liner	$1.98 \times 10^{-11}$	$1.83 \times 10^{-11}$	$3.04 \times 10^{-11}$	$4.22 \times 10^{-11}$	$3.43 \times 10^{-11}$	$3.17 \times 10^{-11}$

### ■ Ponto ao norte

#### ■ Modelo Gaussiano

Out[90]//ScientificForm=

	>=1	1 a 2	2 a 7	7 a 12	12 a 17	> 17
RP1	$1.34 \times 10^{-5}$	$1.24 \times 10^{-5}$	$2.05 \times 10^{-5}$	$2.85 \times 10^{-5}$	$2.32 \times 10^{-5}$	$2.14 \times 10^{-5}$
RP2	$2.29 \times 10^{-6}$	$2.08 \times 10^{-6}$	$3.78 \times 10^{-6}$	$5.58 \times 10^{-6}$	$4.84 \times 10^{-6}$	$4.69 \times 10^{-6}$
RC2	$6.22 \times 10^{-8}$	$5.73 \times 10^{-8}$	$1.02 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-7}$	$1.28 \times 10^{-7}$	$1.23 \times 10^{-7}$
Liner	$7.44 \times 10^{-8}$	$6.88 \times 10^{-8}$	$1.14 \times 10^{-7}$	$1.58 \times 10^{-7}$	$1.29 \times 10^{-7}$	$1.19 \times 10^{-7}$

#### ■ Modelo CFD

Out[93]//ScientificForm=

	>=1	1 a 2	2 a 7	7 a 12	12 a 17	> 17
RP1	$3.1 \times 10^{-9}$	$2.87 \times 10^{-9}$	$4.76 \times 10^{-9}$	$6.6 \times 10^{-9}$	$5.37 \times 10^{-9}$	$4.95 \times 10^{-9}$
RP2	$5.31 \times 10^{-10}$	$4.82 \times 10^{-10}$	$8.76 \times 10^{-10}$	$1.29 \times 10^{-9}$	$1.12 \times 10^{-9}$	$1.09 \times 10^{-9}$
RC2	$1.44 \times 10^{-11}$	$1.33 \times 10^{-11}$	$2.37 \times 10^{-11}$	$3.46 \times 10^{-11}$	$2.97 \times 10^{-11}$	$2.84 \times 10^{-11}$
Liner	$1.72 \times 10^{-11}$	$1.59 \times 10^{-11}$	$2.64 \times 10^{-11}$	$3.66 \times 10^{-11}$	$2.98 \times 10^{-11}$	$2.75 \times 10^{-11}$

---

## Análise dos núclídeos envolvidos

Para crianças de 7 a 12 anos e categoria E

Out[102]/TableForm=

54 Mn	$3.14133 \times 10^{-7}$
59 Fe	$2.80643 \times 10^{-7}$
58 Co	$5.4876 \times 10^{-6}$
60 Co	$6.66924 \times 10^{-6}$
89 Sr	$7.61339 \times 10^{-8}$
90 Sr	$1.77171 \times 10^{-7}$
90 Y	$2.60186 \times 10^{-9}$
91 Y	$1.45074 \times 10^{-8}$
95 Zr	$1.16933 \times 10^{-8}$
95 Nb	$5.53649 \times 10^{-9}$
99 Mo	$1.17866 \times 10^{-7}$
131 Iodo	0.0000121112
133 Iodo	$4.66648 \times 10^{-7}$
135 Iodo	$2.63716 \times 10^{-8}$
132 Te	$1.20898 \times 10^{-7}$
134 Cs	$4.78078 \times 10^{-6}$
136 Cs	$1.01703 \times 10^{-8}$
137 Cs	0.0000399025
140 Ba	$1.51262 \times 10^{-8}$
140 La	$4.57254 \times 10^{-9}$
144 Ce	$1.46739 \times 10^{-7}$
144 PR	$9.14713 \times 10^{-11}$

Out[103]/TableForm=

54 Mn	$1.54819 \times 10^{-8}$
58 Co	$2.48855 \times 10^{-8}$
60 Co	$1.29062 \times 10^{-6}$
63 Ni	$7.15915 \times 10^{-8}$
65 Zn	$4.56254 \times 10^{-9}$
90 Sr	$1.56965 \times 10^{-7}$
90 Y	$2.35828 \times 10^{-9}$
110 mAg	$3.57618 \times 10^{-8}$
122 Sb	$1.34862 \times 10^{-8}$
124 Sb	$2.96345 \times 10^{-7}$
125 Sb	$1.66291 \times 10^{-7}$
134 Cs	$6.29764 \times 10^{-7}$
137 Cs	$5.71871 \times 10^{-6}$
137 mBa	$5.42327 \times 10^{-6}$

Out[104]/TableForm=

58 Co	$2.6632 \times 10^{-9}$
60 Co	$2.33011 \times 10^{-7}$
134 Cs	$1.50655 \times 10^{-8}$
137 Cs	$1.1107 \times 10^{-7}$
54 Mn	$1.14566 \times 10^{-9}$
124 Sb	$5.14868 \times 10^{-9}$
59 Fe	$1.29689 \times 10^{-9}$
95 Zr	$1.98133 \times 10^{-9}$

Out[105]/TableForm=

54 Mn	$1.74396 \times 10^{-9}$
-------	--------------------------

59 Fe	$1.55744 \times 10^{-9}$
58 Co	$3.04639 \times 10^{-8}$
60 Co	$3.70237 \times 10^{-8}$
89 Sr	$4.22558 \times 10^{-10}$
90 Sr	$9.83441 \times 10^{-10}$
90 Y	$1.44496 \times 10^{-11}$
91 Y	$8.05191 \times 10^{-11}$
95 Zr	$6.49084 \times 10^{-11}$
95 Nb	$3.07365 \times 10^{-11}$
99 Mo	$6.5433 \times 10^{-10}$
131 Iodo	$6.72197 \times 10^{-8}$
133 Iodo	$2.59173 \times 10^{-9}$
135 Iodo	$1.46358 \times 10^{-10}$
132 Te	$6.71076 \times 10^{-10}$
134 Cs	$2.65424 \times 10^{-8}$
136 Cs	$5.64432 \times 10^{-11}$
137 Cs	$2.21497 \times 10^{-7}$
140 Ba	$8.3963 \times 10^{-11}$
140 La	$2.53814 \times 10^{-11}$
144 Ce	$8.14469 \times 10^{-10}$
144 PR	$5.07709 \times 10^{-13}$

## Análise de sensibilidade

Para crianças de 7 a 12 anos devido à queda do embalado contendo resina do primário de Angra 1

### ■ Variando a velocidade versus Categorias de Estabilidade - ponto mais próximo

Out[113]//ScientificForm=

	Categoria D	Categoria E	Categoria F
0,875	$6.33 \times 10^{-5}$	$1.09 \times 10^{-4}$	$1.06 \times 10^{-4}$
1,3	$4.26 \times 10^{-5}$	$7.33 \times 10^{-5}$	$7.12 \times 10^{-5}$
1,8	$3.08 \times 10^{-5}$	$5.29 \times 10^{-5}$	$5.14 \times 10^{-5}$

### ■ Variando a velocidade versus Categorias de Estabilidade - ponto ao norte

Out[121]//ScientificForm=

	Categoria D	Categoria E	Categoria F
0,875	$1.93 \times 10^{-5}$	$4.24 \times 10^{-5}$	$1.19 \times 10^{-4}$
1,3	$1.3 \times 10^{-5}$	$2.85 \times 10^{-5}$	$8.02 \times 10^{-5}$
1,8	$9.38 \times 10^{-6}$	$2.06 \times 10^{-5}$	$5.79 \times 10^{-5}$

### ■ Variando taxa de liberacao

Out[130]//ScientificForm=

	Categoria E e v = 1,3 m s
0,1%	$2.44 \times 10^{-6}$
1%	$2.44 \times 10^{-5}$
3%	$7.33 \times 10^{-5}$
5%	$1.22 \times 10^{-4}$

## Análise de sensibilidade - CFD

Out[141]//ScientificForm=

Dose	Difusividade cinemática
$7.6085 \times 10^{-9}$	$10^{-3}$
$7.6096 \times 10^{-9}$	$10^{-5}$
$7.6096 \times 10^{-9}$	$10^{-7}$

---

## Referências

- Alves, A.S., Resina Exaurida. Análise Radiológica para a Resina Exaurida de Angra 2, Relatório ETN No. BN/2/0068/1170/08040, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- Crowl, D.A. e Louvar, J.F., Chemical Process Safety, 3ª edição, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2001.
- Dias, W. B., Angra 2 : Manual de Controle Radiológico do Meio Ambiente - MCRMA, Relatório Técnico ETN CP/2/1170/000001, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- ETN, Angra 1, Final Safety Analysis Report, Rev.34 ", Rio de Janeiro, Brasil, 2005a.
- ETN, Angra 2, Final Safety Analysis Report, Rev. 11, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- ETN, Banco de Dados de Rejeitos de Angra, – REJAN, Angra dos Reis, Brasil, 2005 b.
- IAEA, Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Report Series No .19, Viena, Austria, 2001.